

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Таваров С. Ш., Маджидов Г. Х.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ г. ДУШАНБЕ

5

Козырев Г. И., Кравцов А. Н., Усиков В. Д.

РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ ОПРОСА В МНОГОКАНАЛЬНЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
С ЕДИНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТОЧНОСТНЫХ ПОЗИЦИЙ

14

Ефремов А. С., Швед А. С., Лукичев А. В.

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОВЕРОЧНЫХ ОРГАНОВ

22

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Светлов А. В., Нгуен Нгок Мань

АМПЛИТУДНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

31

Михайлов П. Г., Маринина Л. А., Глебова Т. А.,

Базарбай А., Соколов А. В., Аналиева А. У.

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОДОРОДА. МЕТОДЫ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И БАЗОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

38

Григорьян Л. Р., Богатов Н. М.

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ В ИДЕНТИФИКАЦИИ
МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОГО
ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

48

Волков В. С., Волкова Н. В., Конкина М. С.
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ
РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЧАСТОТУ

58

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Крамм М. Н.
ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР СЕРДЦА
ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

65

Еськов В. М., Григоренко В. В., Назина Н. Б.
СИСТЕМЫ ТРЕТЬЕГО ТИПА В МЕДИЦИНСКОЙ
КИБЕРНЕТИКЕ И БИОМЕХАНИКЕ В ЦЕЛОМ

72

ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

**Михайлов П. Г., Чиркина М. А., Сазонова В. П.,
Маринина Л. А., Базарбай А.**
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОДОРОДНЫХ СЕНСОРОВ.
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМИРОВАНИЯ

80

**Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В.,
Козлов Г. В., Зинченко Т. О., Смогунов В. В.**
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, СИНТЕЗИРУЕМЫХ
МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

89

**Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Печерский А. В.,
Гурин С. А., Сибринин Б. П., Антипенко В. В.**
АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

100

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Tavarov S. Sh., Madzhidov G. Kh.

ENHANCING THE RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY
OF THE CITY ELECTRIC NETWORK OF DUSHANBE

5

Kozyrev G. I., Kravcov A. N., Usikov V. D.

CALCULATING OF THE POLLING FREQUENCY
IN MULTI-CHANNEL INFORMATION-MEASURING SYSTEMS
THE SAME ENERGETIC AND ACCURACY POSITIONS

14

Efremov A. S., Shved A. S., Lukichev L. V.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL
DISTRIBUTED SYSTEM OF INSPECTION BODIES

22

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Svetlov A. V., Nguyen Ngoc Manh

AMPLITUDE DETECTOR FOR CONSTRUCTING INSTRUMENTS
TO MEASURE PARAMETERS OF RESONANT ELECTRIC CIRCUITS

31

Mikhaylov P. G., Marinina L. A., Glebova T. A.,

Bazarbay L., Sokolov A. V., Analieva A. U.

SENSITIVE ELEMENTS OF HYDROGEN.
CONVERSION METHODS AND BASIC CONSTRUCTS

38

Grigor'yan L. R., Bogatov N. M.

APPLICATION OF PHASE METHODS IN IDENTIFICATION
OF PLACES OF DAMAGE TO INSULATION
COATING OF PIPELINES

48

Volkov V. S., Volkova N. V., Konkina M. S.
THE ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES
OF USING SEMICONDUCTOR STRAIN GAGES
TO BUILD FREQUENCY INTEGRATING UNFOLDING
CONVERTERS OF MECHANICAL VALUES INTO FREQUENCY

58

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Kramm M. N.
EQUIVALENT ELECTRIC HEART GENERATOR
FOR NON-INVASIVE ELECTROCARDIAC DIAGNOSTICS

65

Es'kov V. M., Grigorenko V. V., Nazina N. B.
MEDICAL CYBERNETICS AND BIOMECHANICS:
THIRD TYPE SYSTEMS

72

INSTRUMENTATION TECHNOLOGIES

**Mikhailov P. G., Chirkina M. A., Sazonova V. P.,
Marinina L. A., Basarbay L.**
SENSITIVE ELEMENTS OF HYDROGEN SENSORS.
FEATURES OF FORMATION TECHNOLOGIES

80

**Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V.,
Kozlov G. V., Zinchenko T. O., Smogunov V. V.**
THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS
ON THE PROPERTIES OF COATINGS SYNTHESIZED
BY MICROARC OXIDATION

89

**Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Pecherskiy A. V.,
Gurin S. A., Sibrinin B. P., Antipenko V. V.**
ANALYSIS OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE SYNTHESIS
PROCESS TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES

100

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.316.1

DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-1

С. Ш. Таваров, Г. Х. Маджидов

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ г. ДУШАНБЕ

S. Sh. Tavarov, G. Kh. Madzhidov

ENHANCING THE RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY OF THE CITY ELECTRIC NETWORK OF DUSHANBE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается городская электрическая сеть г. Душанбе на предмет определения повреждаемости кабельных и воздушных линий, а также трансформаторных подстанций напряжением 6–10/0,4 кВ. На основании собранных материалов аварийных отключений по месяцам получены распределения перечисленных выше объектов 2017–2018 гг. **Материалы и методы.** По статистическим данным аварийных отключений для осенне-зимних и зимне-весенних периодов 2017–2018 гг. с целью выявления влияния получены зависимости повреждений элементов городской электрической сети от температуры воздуха и количества осадков. Предлагается уравнение прогнозирования электропотребления для г. Душанбе, а также возможность применения его для других городов Республики Таджикистан с учетом факторных условий местности. **Результаты и выводы.** На основе полученного уравнения предлагается алгоритм контроля электропотребления с внесением данного алгоритма в функцию умных средств учета электроэнергии с целью поддержания режимных параметров распределительной сети, позволяющей повысить надежность электроснабжения как г. Душанбе, так и всех городов Республики Таджикистан.

A b s t r a c t. Background. The paper considers the city electric network of Dushanbe for determining the damage to cable and overhead lines, as well as transformer substations of 6–10/0.4 kV. Based on the collected materials of emergency shutdowns by months, the obtained distributions of the above objects in 2017–2018 are obtained. **Materials and methods.** According to the statistics of emergency outages for the autumn-winter and winter-spring periods of 2017–2018, in order to identify the effect, the dependences of damage to the elements of the urban electric network on air temperature and rainfall were obtained. An equation is proposed for predicting power consumption for the city of Dushanbe, as well as the possibility of applying it to other cities of the Republic of Tajikistan, taking into account the factorial conditions of the terrain. **Results and conclusions.** Based on the obtained equation, an algorithm for monitoring power consumption is proposed with the introduction of this algorithm into the function of smart means of electricity metering in order to maintain the operating parameters of the distribution network, which can increase the reliability of power supply in both Dushanbe and all cities of the Republic of Tajikistan.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электропотребление, надежность электроснабжения, городские электрические сети.

К e y w o r d s: power consumption, reliability of power supply, urban electric networks.

Эффективность любых электрических сетей, в том числе городских, обеспечивается поддержанием допустимых удельных нагрузок, как в часы максимума, так и в течение всего дня и месяца. Превышение же удельных нагрузок от нормативных приводит к ухудшению надежности системы электроснабжения и качества электроэнергии [1–17].

Для повышения надежности сетей необходимо выявить факторы, влияющие на повреждения основных элементов системы электроснабжения, с целью предложения метода и способа повышения надежности электроснабжения городской электрической сети на примере г. Душанбе.

Во многом появление повреждений связано с ростом электропотребления, которое зависит от факторов климато-метеорологических условий местности [5, 6] и обеспеченности потребителей не только электроэнергией, но также другими энергиями, такими как природный газ, отопление и теплоснабжение.

Надо отметить то, что потребители г. Душанбе так же, как и вся Республика Таджикистан, лишены иных источников и вся нагрузка приходится на электричество.

Для оценки надежности электроснабжения городской электрической сети г. Душанбе, по данным статистики аварийных отключений за периоды 2017–2018 гг., были построены зависимости и проведен анализ с целью выявления влияния вышеприведенного фактора на количество повреждения кабельных, воздушных линий и трансформаторных подстанций напряжением 6–10/0,4 кВ.

Надо отметить, что самым холодным месяцем для г. Душанбе является январь. Средняя температура воздуха зимних месяцев колеблется от 2 до 4 °С. В этот период преобладает в основном пасмурная и дождливая погода, обусловленная циклонической деятельностью. Как правило, прохождение циклона завершается холодным вторжением, резким понижением температуры воздуха и переходом дождя в мокрый снег. При усилении антициклонической деятельности на Душанбе распространяется холодный воздух юго-западной периферии сибирского антициклона, что вызывает значительные похолодания. В аномально холодные годы температура воздуха может опускаться до –27 °С.

Однако наибольшую повторяемость имеют зимы с минимальной температурой 5... –10 °С. Днем, как правило, температура воздуха положительная и составляет 7–10 °С тепла. В наиболее теплые зимы максимальная температура воздуха может достигать в январе 22 °С тепла. Весна в Душанбе теплая и дождливая. Циклоническая деятельность весной протекает особенно интенсивно и сопровождается выпадением обильных осадков с грозами и градом. В марте и апреле выпадает наибольшее количество осадков (до 135 мм в месяц). Самый высокий суточный максимум приходится на весну и превышает 80 мм.

По статистике аварийных отключений КЛ, ВЛ и ТП напряжением 6–10 кВ были построены зависимости, представленные на рис. 1, 2.

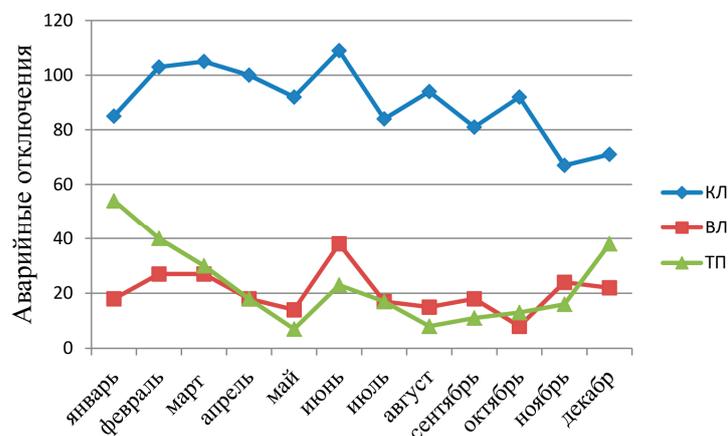


Рис. 1. Статистика аварийных отключений по месяцам за 2017 г.

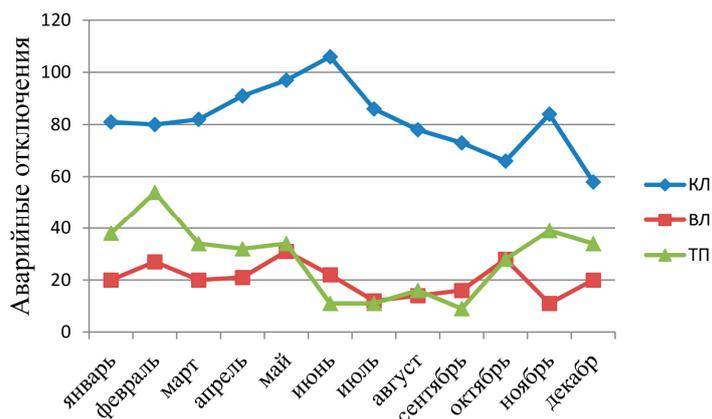


Рис. 2. Статистика аварийных отключений по месяцам за 2018 г.

Согласно рис. 1 и 2 наиболее повреждаемыми элементами в осенне-зимний и зимне-весенний периоды являются кабельные линии электропередачи и трансформаторные подстанции. Это связано, с нашей точки зрения, с возрастанием электропотребления в осенне-зимний период из-за отсутствия иных источников энергии, кроме электрической, и увеличением осадков в зимне-весенний период, вызванным дождями и таянием снега.

Это приводит к попаданию влаги в места соединения контактов, что способствует появлению повреждений муфт, установленных на кабельных линиях.

Для оценки влияния среднемесячных температур и количества осадков были построены распределения повреждений, приведенные на рис. 3 и 4.

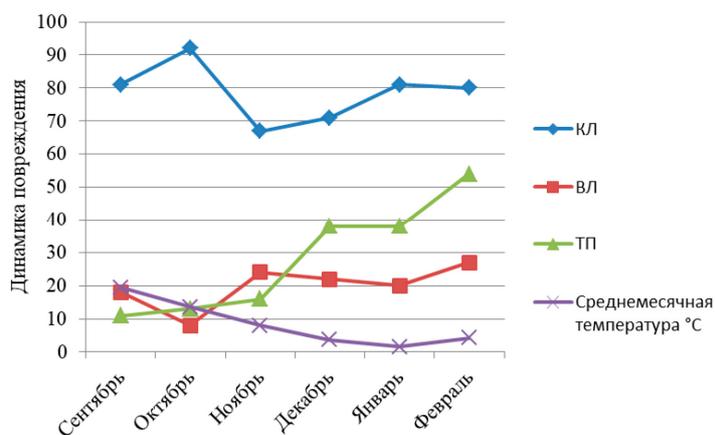


Рис. 3. Влияние среднемесячной температуры воздуха на динамику повреждений в осенне-зимний период 2017–2018 гг.

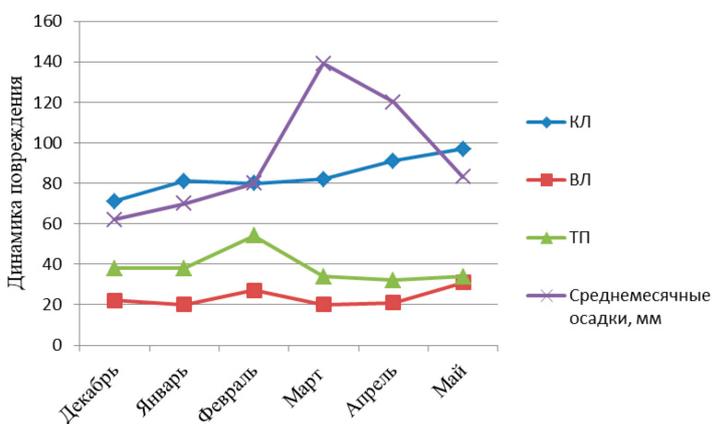


Рис. 4. Влияние среднемесячных осадков на динамику повреждений в зимне-весенний период 2017–2018 гг.

Из полученной зависимости рис. 3 видно, что в осенне-зимний период при понижении среднемесячной температуры количество повреждений рассматриваемых элементов городской электрической сети, в особенности в кабельных линиях и трансформаторных подстанциях, возрастает. Как было отмечено выше, главным фактором выступает увеличение электропотребления городскими потребителями, приводящего к перегреву жил кабельных линий и обмоток трансформатора и дальнейшему пробою изоляции.

С целью регулирования режимных параметров городских электрических сетей оперативно-диспетчерской службой в данной работе предлагается метод прогнозирования электропотребления для бытовых потребителей с учетом факторных условий на основе уравнения коэффициента времени максимума нагрузок – $\alpha_{в.м.н}$, полученного для г. Душанбе и различных городов РТ [18, 19] и имеющего функциональную зависимость

$$\alpha_{в.м.н} = f(x_i), \quad (1)$$

$$x_i = x_1; x_2; x_3; x_4; x_5, \quad (2)$$

где x_1 – температура; x_2 – особенности конструкции домов; x_3 – разность высот над уровнем моря расположения городов; x_4 – влажность воздуха; x_5 – скорость ветра.

Ниже приведем уравнение прогнозирования электропотребления с учетом факторных условий местности г. Душанбе и РТ в целом в часы максимума нагрузок и в течение всего дня:

$$W_{\alpha_{в.м.н}+1} = W_{сут. норм.} \alpha_{в.м.н} (1 - \alpha_{в.м.н}), \quad (3)$$

где $W_{сут. норм.} = P_{разр.} t_{в.м.сут.}$ – суточная норма расхода электроэнергии, кВт·ч; $P_{разр.}$ – разрешенная мощность, выдаваемая электроснабжающей организацией (4–5 кВт); $t_{в.м.сут.}$ – время максимума нагрузок в течение суток, ч; $\alpha_{в.м.н}$ – коэффициент времени максимума нагрузок.

Полученное уравнение позволит прогнозировать, планировать и контролировать предлагаемые нормы электропотребления [18, 19] без нарушения установленных норм удельных нагрузок и тем самым повысить надежность электроснабжения и качество электроэнергии.

Для сопоставления с экспериментальными значениями выполним расчет, используя приведенное уравнение (3) для бытовых потребителей г. Душанбе, учитывая территориальные и климато-метеорологические условия. Хотим отметить, что данное уравнение (3) позволяет прогнозировать, планировать и контролировать электропотребление и для других бытовых потребителей городов Республики Таджикистан.

Для города Душанбе (столица Республики Таджикистан, расположенная на высоте 706 м над уровнем море):

$$W_{\alpha_{в.м.н}} = 96 \cdot 0,145 \cdot (1 - 0,145) = 11,902 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{\alpha_{ост.в теч. дня}} = 96 \cdot 0,854 \cdot (1 - 0,854) = 11,97 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\sum W_{\alpha_{в теч. дня}} = 11,902 + 11,97 = 23,87 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

По данным учета электропотребления за предыдущий период на рис. 5 приведены результаты сравнения расчетных (уравнение (3)) и экспериментальных значений.

Согласно рис. 5 предлагаемое уравнение (3) прогнозирования электропотребления является адекватным.

С применением современных умных учетов электроэнергии возможно контролировать состояние электрических сетей и в нашем случае, для г. Душанбе и городов Республики Таджикистан [18, 19].

Таким образом, предлагаем следующий алгоритм контроля норм электропотребления как в часы максимума нагрузок, так и в течение всего дня и месяца для г. Душанбе и городов РТ с внесением этого алгоритма в функцию умных учетов электроэнергии (рис. 6).

**Условия потребления и контроля норм электропотребления
бытовых потребителей городов Республики Таджикистан**

При соблюдении условий потребления электроэнергии в часы максимума нагрузок и в течение дня, месяца:

$$W_{\alpha_{в.м.н}+1} = W_{норм},$$

где $W_{\alpha_{в.м.н}+1}$ – прогнозирование электропотребления, кВт·ч; $W_{норм}$ – нормы электропотребления кВт·ч [18, 19].

Полученная информация автоматически передается на сохранение. Тогда как если $W_{\alpha_{в.м.н}+1} > W_{норм}$, информация о данных потребителей берется под контроль и в течение трех дней за данным потребителем, в особенности в часы максимума нагрузок, ведется контроль данных электропотребления.

Обусловлено это тем, что именно в это время потребляется большая часть электроэнергии, а также наблюдаются основные перегрузки, данные которых также сохраняются в ЦСИ. Если в течение трех дней условия $W_{\alpha_{в.м.н}+1} > W_{норм}$ не переходят к условию $W_{\alpha_{в.м.н}+1} \leq W_{норм}$, абонента оповещают о перерасходе электропотребления. Данное оповещение, по нашему мнению, должно стимулировать как потребителей электроэнергии, так и контроль надежности системы электроснабжения.

После оповещения на следующий день вновь ведется контроль электропотребления, особенно в часы максимума нагрузок. В случае выполнения условия $W_{\alpha_{в.м.н}+1} \leq W_{норм}$ информация передается на сохранение.

Однако в случае дальнейшего несоблюдения норм электропотребления абоненту выписывается рекомендация о замене однофазного счетчика электроэнергии на трехфазный. Данная рекомендация делается с точки зрения повышения надежности электроснабжения, качества электроэнергии и уменьшения недоотпуска полезной мощности.

На основе предложенного алгоритма контроля норм электропотребления (см. рис. 6) было предложено схематическое исполнение приема-передачи информации от умных учетов электроэнергии к «Data Center Union» и от «Data Center Union» в центр сбора информации ЦСИ по каналу WAN, приведенное на рис. 7.

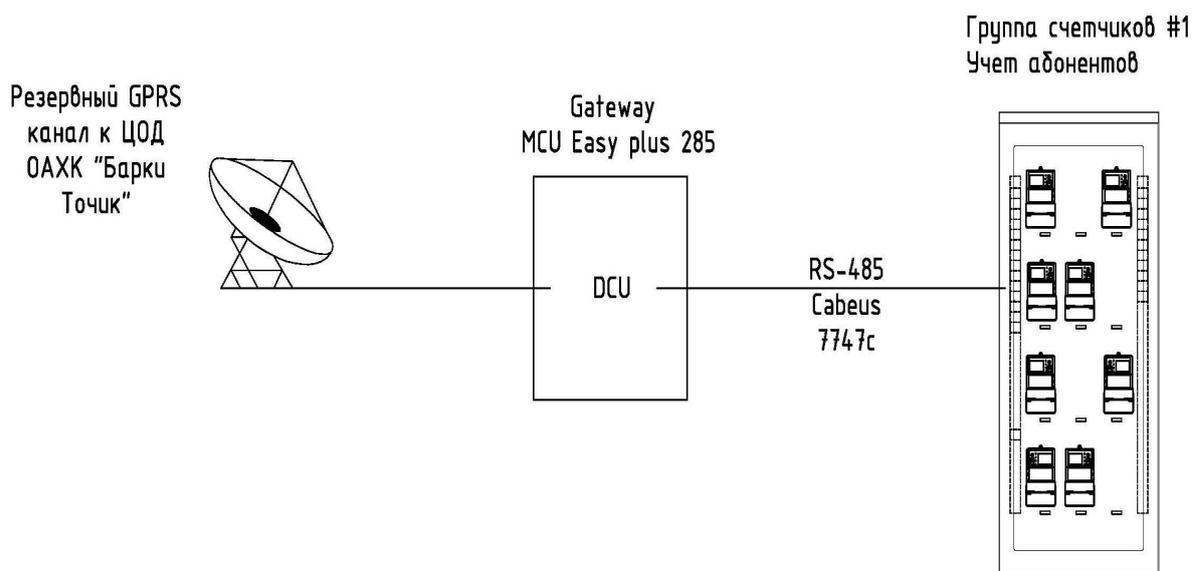


Рис. 7. Схема приема-передачи информации от абонента в ЦСИ

Предложенная «Схема приема-передачи информации от абонента в ЦСИ», приведенная на рис. 7, рекомендована электроснабжающей организацией ОАХК «Барки Таджики» для внедрения в программу замены существующих учетов электроэнергии у бытовых потребителей на умные учеты.

Заклучение

1. По данным статистики аварийных отключений за периоды 2017–2018 гг. были построены зависимости и проведен анализ с целью выявления влияния фактора на количество повреждений кабельных, воздушных линий и трансформаторных подстанций напряжением 6–10/0,4 кВ городской электрической сети г. Душанбе.

2. Для снижения повреждений в городских электрических сетях г. Душанбе и городов Республики Таджикистан и повышения надежности электроснабжения предложено уравнение прогнозирования электропотребления г. Душанбе и для городов Республики Таджикистан.

3. Результаты, полученные расчетным путем с использованием предложенного уравнения, сопоставлены с экспериментальными данными и показали высокую сходимость.

4. На основе данного уравнения прогнозирования предложен алгоритм контроля электропотребления с внесением его в функциональность умных средств учета электроэнергии в программу замены средств учета электроэнергии.

Библиографический список

1. Репкина, Н. Г. Исследование факторов, влияющих на точность прогнозирования суточного электропотребления / Н. Г. Репкина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 2. – С. 41–45.
2. Карандеев, Д. Ю. Эффективная температура как фактор, влияющий на электропотребления городов / Д. Ю. Карандеев // Современная техника и технологии. – 2015. – № 2. – URL: <http://technology.snauka.ru/2015/02/5728> (дата обращения: 07.02.2019).
3. Зубакин, В. А. Методы и модели анализа волатильности потребления электроэнергии с учетом цикличности и стохастичности / В. А. Зубакин, Н. М. Ковшов // Стратегии Бизнеса (Анализ, прогноз, управление). – 2015. – № 7 (15). – С. 6–12.
4. Коморник, С. Требования к системам прогнозирования энергопотребления / С. Коморник, Е. Каличек // Энерго. Рынок. – 2008. – № 3. – С. 5–7.
5. Макоклюев, Б. И. Моделирование электрических нагрузок электроэнергетических систем / Б. И. Макоклюев, В. Костиков // Электричество. – 1994. – № 10. – С. 6–18.
6. Макоклюев, Б. И. Влияние колебаний метеорологических факторов на электропотребление энергообъединений / Б. И. Макоклюев, В. Павликов, А. Владимиров // Энергетик. – № 6. – 2003. – С. 11–23.
7. СП 256. 1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий, правила проектирования и монтажа. – URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293751/4293751598.htm>
8. РМ-2696-01. Временная инструкция по расчету электрических нагрузок жилых зданий. – Москва : Изд-во ГУП «НИИЦ», 2001. – 22 с.
9. Yahiaet, Z. An optimal load schedule of household appliances with leveled load profile and consumer's preferences / Z. Yahiaet, A. Pradhan // International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE). – Cape Town, South Africa, 2018. – P. 1–7. – URL: <http://dx.doi.org/10.23919/DUE.2018.8384382>
10. Yahiaet, Z. A binary integer programming model for optimal load scheduling of household appliances with consumer's preferences / Z. Yahiaet, P. Kholopane // International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE). – Cape Town, South Africa, 2018. – P. 1–8. – URL: <http://dx.doi.org/10.23919/DUE.2018.8384381>
11. Grigoras, G. Processing of smart meters data for peak load estimation of consumers / G. Grigoras, F. Scarlatache // 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). – Bucharest, Romania, 2015. – P. 864–867.
12. Teeraratkul, T. Shape-Based Approach to Household Electric Load Curve Clustering and Prediction / T. Teeraratkul, D. O'Neill, S. Lall // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2017. – Vol. 9 (5). – P. 5196–5206.
13. Singh, S. Smart Load Node for Nonsmart Load Under Smart Grid Paradigm: A New Home Energy Management System / S. Singh, A. Roy, M. P. Selvan // IEEE Consumer Electronics Magazine. – 2019. – Vol. 8 (2). – P. 22–27.
14. Swalehe, H. Intelligent Algorithm for Optimal Load Management in Smart Home Appliance Scheduling in Distribution System / H. Swalehe, B. Marungsri // International Electrical Engineering Congress (IEEECON). – Krabi, Thailand, 2018. – P. 1–4. – URL: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEECON.2018.8712166>
15. Mohan, N. Demand Side Management for a Household Using Resource Scheduling / N. Mohan, T. P. Imthias Ahamed, J. M. Johnson // International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4). – Thiruvananthapuram, India, 2018. – P. 1–5.
16. Garulli, A. Models and Techniques for Electric Load Forecasting in the Presence of Demand Response / A. Garulli, S. Paoletti, A. Vicino // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2014. – Vol. 23 (3). – P. 1087–1097.

17. *Sidorov, A. I.* Ensuring the Efficiency of Distribution Networks C. Dushanbe and Republic of Tajikistan / A. I. Sidorov, O. A. Khanzhina, S. S. Tavarov // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, Russia, 2019. – P. 1–4.
18. *Сидоров, А. И.* Нормирование электропотребления Республики Таджикистан с учетом климатических особенностей региона / А. И. Сидоров, С. Ш. Таваров // Энергия единой сети. – 2019. – № 3 (45). – С. 70–75. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42391848>
19. *Таваров, С. Ш.* Удельное электропотребление бытового сектора с учетом температуры окружающего воздуха и территориального расположения Республики Таджикистан / С. Ш. Таваров // Промышленная энергетика. – 2019. – Т. 7, № 7. – С. 19–22.

References

1. Repkina N. G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 2015, no. 2, pp. 41–45. [In Russian]
2. Karandeev D. Yu. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii* [Modern equipment and technologies]. 2015, no. 2. Available at: <http://technology.snauka.ru/2015/02/5728> (accessed Febr. 07, 2019). [In Russian]
3. Zubakin V. A., Kovshov N. M. *Strategii Biznesa (Analiz, prognoz, upravlenie)* [Business strategies (Analysis, forecast, management)]. 2015, no. 7 (15), pp. 6–12. [In Russian]
4. Komornik S., Kalichets E. *Energo. Rynok* [Energ. Market]. 2008, no. 3, pp. 5–7. [In Russian]
5. Makoklyuev B. I., Kostikov V. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1994, no. 10, pp. 6–18. [In Russian]
6. Makoklyuev B. I., Pavlikov V., Vladimirov A. *Energetik* [Powerman]. 2003, no. 6, pp. 11–23. [In Russian]
7. SP 256. 1325800.2016. *Elektrostanovki zhilykh i obshchestvennykh zdaniy, pravila proektirovaniya i montazha* [SP 256. 1325800.2016. Electrical installations of residential and public buildings, design and installation rules]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293751/4293751598.htm> [In Russian]
8. RM-2696-01. *Vremennaya instruktsiya po raschetu elektricheskikh nagruzok zhilykh zdaniy* [RM-2696-01. Temporary instructions for calculating electrical loads of residential buildings]. Moscow: Izd-vo GUP «NIATs», 2001, 22 p. [In Russian]
9. Yahiaet Z., Pradhan A. *International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*. Cape Town, South Africa, 2018, pp. 1–7. Available at: <http://dx.doi.org/10.23919/DUE.2018.8384382>
10. Yahiaet Z., Kholopane P. *International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*. Cape Town, South Africa, 2018, pp. 1–8. Available at: <http://dx.doi.org/10.23919/DUE.2018.8384381>
11. Grigoras G., Scarlatache F. *9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. Bucharest, Romania, 2015, pp. 864–867.
12. Teeraratkul T., O'Neill D., Lall S. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017, vol. 9 (5), pp. 5196–5206.
13. Singh S., Roy A., Selvan M. P. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2019, vol. 8 (2), pp. 22–27.
14. Swalehe H., Marungsri B. *International Electrical Engineering Congress (iEE-CON)*. Krabi, Thailand, 2018, pp. 1–4. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/IEECON.2018.8712166>
15. Mohan N., Imthias Ahamed T. P., Johnson J. M. *International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4)*. Thiruvananthapuram, India, 2018, pp. 1–5.
16. Garulli A., Paoletti S., Vicino A. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014, vol. 23 (3), pp. 1087–1097.
17. Sidorov A. I., Khanzhina O. A., Tavarov S. S. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1–4.
18. Sidorov A. I., Tavarov S. Sh. *Energiya edinoi seti* [The energy of a single network]. 2019, no. 3 (45), pp. 70–75. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42391848> [In Russian]
19. Tavarov S. Sh. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 2019, vol. 7, no. 7, pp. 19–22. [In Russian]

Таваров Саиджон Ширалиевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра безопасности жизнедеятельности,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
(Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 76)
E-mail: tabarovsaid@mail.ru

Tavarov Saidzhon Shiralievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of life safety,
South Ural State University
(National Research University)
(76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia)

Маджидов Гафуржон Хушбахтович
ассистент,
кафедра электроснабжения,
Таджикский технический университет
имени академика М. С. Осими
(Таджикистан, г. Душанбе,
ул. Академиков Раджабовых, 10)
E-mail: madjidov-70@mail.ru

Madzhidov Gafurzhon Khushbaktovich
assistant,
sub-department of power supply,
Tajik Technical University
named after academician M. S. Osimi
(10 Akademikov Radzhabovых street,
Dushanbe, Tajikistan)

Образец цитирования:

Таваров, С. Ш. Повышение надежности электроснабжения городской электрической сети г. Душанбе / С. Ш. Таваров, Г. Х. Маджидов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 5–13. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-1.

Г. И. Козырев, А. Н. Кравцов, В. Д. Усиков

РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ ОПРОСА В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ЕДИНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТОЧНОСТНЫХ ПОЗИЦИЙ

G. I. Kozyrev, A. N. Kravcov, V. D. Usikov

CALCULATING OF THE POLLING FREQUENCY IN MULTI- CHANNEL INFORMATION-MEASURING SYSTEMS THE SAME ENERGETIC AND ACCURACY POSITIONS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цель. Актуальность темы работы обусловлена необходимостью дискретного представления различных моделей непрерывных сообщений с единых энергетических и точностных позиций. Целью работы является получение простых аналитических выражений для оценки частоты опроса (дискретизации) в зависимости от заданной погрешности восстановления, максимальной частоты спектра F_m исходного сообщения с учетом субъективности определения F_m при восстановлении исходного сообщения интерполяционными полиномами Лагранжа. **Результаты.** Рассмотрены три наиболее распространенных модели измерительных сообщений, когда энергетический спектр и корреляционная функция исходного процесса представляются как: реакция идеального фильтра нижних частот (ФНЧ) на белый шум, реакция низкочастотного RC-фильтра на белый шум, реакция гауссова ФНЧ на белый шум. Произведен расчет частоты опроса по полученным в работе приближенным формулам при восстановлении исходного процесса для указанных выше моделей с помощью интерполяционных полиномов Лагранжа нулевого и первого порядков при заданной погрешности восстановления. Субъективность определения F_m была отражена путем введения коэффициента пропорциональности K_p , соответствующего стопроцентному количеству мощности исходного процесса, заключенному в интервале частот $[0, F_m]$. Значения параметра p задавались равными 0,9; 0,95 и 0,99, как наиболее часто используемые на практике. **Выводы.** Введение коэффициента пропорциональности, соответствующего 100 p -процентному количеству мощности исходного процесса, заключенному в интервале частот $[0, F_m]$, позволяет учесть субъективность определения F_m и подойти к анализу дискретного представления различных моделей непрерывных сообщений с единых энергетических и точностных позиций. При этом отпадает необходимость в использовании других параметров энергетического спектра, таких как эффективное значение спектра, ширина спектра на уровне 0,707, 50 %, 25 % мощности и т.д.

A b s t r a c t. Background. The relevance of the topic of work is due to the need for a discrete presentation of various models of continuous communications from a single energy and precision positions. The aim of the work is to obtain simple analytical expressions for estimating the polling (sampling) frequency depending on a given reconstruction error, the maximum frequency of the spectrum F_m of the initial message, taking into account the subjectivity of the determination of F_m when restoring the original message by Lagrange interpolation polynomials. **Results.** The three most common models of measuring messages are considered, when the

energy spectrum and the correlation function of the initial process are presented as: the response of an ideal low-pass filter (LPF) to white noise, the reaction of a low-frequency RC filter to white noise, the reaction of a Gaussian low-pass filter to white noise. The polling frequency was calculated using the approximate formulas obtained in the work when restoring the initial process for the above models using Lagrange interpolation polynomials. zero and first orders for a given error recovery. The determination subjectivity was reflected by introducing a proportionality coefficient K_p corresponding to $100p$ – the percentage of the power of the initial process, enclosed in the frequency range $[0, F_m]$. The values of the parameter p were set equal to 0.9; 0.95 and 0.99, as the most commonly used in practice. **Conclusions.** The introduction of the proportionality coefficient corresponding to $100p$ — the percentage of the power of the initial process, enclosed in the frequency interval $[0, F_m]$, allows one to take into account the subjectivity of the determination of F_m and approach the analysis of the discrete representation of various models of continuous messages from the same energy and accuracy positions. In this case, there is no need to use other parameters of the energy spectrum, such as the effective value of the spectrum, the width of the spectrum at the level of 0.707, 50 %, 25 % of the power, etc.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частота опроса, энергетический спектр, корреляционная функция, максимальная частота спектра, погрешность восстановления.

К e y w o r d s: interrogation frequency, energy spectrum, correlation function, maximum spectrum frequency, reconstruction error.

Введение

Большинство существующих информационно-измерительных систем с временным разделением канальных сигналов, в том числе телеметрических, построено по принципу передачи мгновенных значений (отсчетов) контролируемых непрерывных величин через равноотстоящие промежутки времени или с постоянной частотой опроса (дискретизации).

Очевидно, что восстановление непрерывного сообщения конечной длительности по его дискретным значениям может производиться лишь с определенной погрешностью, которая, в свою очередь, зависит от динамических характеристик передаваемого сообщения, выбранного метода восстановления и частоты опроса [1, 2].

В практике измерений, например в телеметрии, погрешность восстановления обычно задается в виде приведенной среднеквадратической погрешности $\gamma_B = \sigma_B / L$, где σ_B – среднеквадратическое отклонение погрешности восстановления, $L = x_{\max} - x_{\min}$ – диапазон (шкала) изменения измеряемой величины $x(t)$.

Динамика измеряемой величины, как правило, выражается через максимальную (граничную) частоту процесса $x(t)$, которая на практике обычно определяется с помощью выражения

$$\int_0^{F_m} G_x(f) df = p E_x, \quad (1)$$

где $E_x = \int_0^{\infty} G_x(f) df$ – полная мощность процесса; p – параметр, учитывающий, какое количество мощности процесса, по сравнению с E_x , заключено в интервале $[0, F_m]$.

В назначении параметра p заключается «субъективный произвол» как проектировщика системы сбора и передачи измерительной информации, так и зачастую пользователя данной информации, которые при определении F_m обычно оперируют энергетическими представлениями об исходном процессе, а не точностными. Очевидно, что энергетические и точностные показатели связаны между собой, так как параметр p указывает на степень «обрезания» энергетического спектра исходного непрерывного сообщения (теоретически бесконечного за счет конечной временной реализации $x(t)$) при выборе F_m и дальнейшем его дискретном представлении. По аналогии со случайными величинами параметр p играет роль доверительной

вероятности и учитывает потери в исходной информации за счет приближенности оператора дискретного представления.

Отсюда величина параметра p должна учитываться при расчете погрешности восстановления процесса $x(t)$. В проводимых ниже рассуждениях по оценке частоты опроса значения параметра p задавались равными 0,9; 0,95 и 0,99, как наиболее часто используемые на практике.

В качестве методов восстановления широкое распространение получили неоптимальные, но универсальные и легко реализуемые на практике методы на основе интерполяционных полиномов Лагранжа нулевого и первого порядков. При этом расчет частоты опроса с использованием полного описания корреляционных функций исходных процессов требует большого количества априорной информации и громоздких вычислений. Приближенные же выражения либо дают завышенные оценки, например, при использовании неравенства Бернштейна, связывающего максимальную частоту спектра с верхней границей производной n -го порядка ансамбля реализаций исходного процесса, либо требуют учета и сопоставления различных параметров энергетического спектра и корреляционной функции исходного процесса, либо не учитывают указанный «субъективный произвол» при нахождении максимальной частоты спектра измеряемой величины [3].

Задачей данной статьи является получение простых аналитических выражений для оценки частоты опроса (дискретизации) F_o в зависимости от заданной погрешности восстановления, максимальной частоты спектра исходного сообщения с учетом субъективности определения F_m при восстановлении исходного сообщения интерполяционными полиномами Лагранжа.

Вывод аналитических выражений для оценки частоты опроса

Пусть измеряемая величина $x(t)$ является гауссовским стационарным случайным процессом с энергетическим спектром $G_x(f)$ и нормированной корреляционной функцией $R_x(\tau)$. При восстановлении процесса $x(t)$ с помощью симметричного интерполятора нулевого порядка (ИНП) максимальная величина погрешности восстановления [4]

$$\gamma_{B\max} = \sqrt{2[1 - R_x(T_o/2)]} \gamma_x,$$

где $T_o = 1/F_o$ означает период опроса измеряемой величины; $\gamma_x = \sigma_x/L$ – приведенное среднеквадратическое отклонение процесса $x(t)$ со шкалой изменения L .

Для гауссовского процесса $L \cong 6\sigma_x$. Отсюда величина $\gamma_{B\max}$, взятая в процентах,

$$\gamma_{B\max} = 23,57 \sqrt{1 - R_x(T_o/2)}. \quad (2)$$

При восстановлении процесса $x(t)$ с помощью интерполятора первого порядка (ИПП) [4]

$$\gamma_{B\max} = 16,67 \sqrt{1,5 - 2R_x(T_o/2) + 0,5R_x(T_o)}. \quad (3)$$

Как видно из выражений (1) – (3), для нахождения аналитических взаимосвязей между F_o , γ_{Bm} и F_m необходимо знать энергетический спектр $G_x(f)$ и корреляционную функцию $R_x(\tau)$ процесса $x(t)$.

Рассмотрим три наиболее распространенные модели измерительных сообщений, когда энергетический спектр и корреляционная функция исходного процесса представляются как:

1) реакция идеального фильтра нижних частот (ИФНЧ) на белый шум

$$G_x(f) = \frac{1}{F_m}, \quad f \in [0, F_m], \quad (4)$$

$$G_x(f) = 0, \quad f \notin [0, F_m],$$

$$R_x(\tau) = \frac{\sin 2\pi F_m \tau}{2\pi F_m \tau}; \quad (5)$$

2) реакция низкочастотного RC -фильтра на белый шум

$$G_x(f) = \frac{4\alpha}{\alpha^2 + 4\pi^2 f^2}, \quad (6)$$

$$R_x(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}, \quad \alpha = \frac{1}{RC}; \quad (7)$$

3) реакция гауссова ФНЧ на белый шум

$$G_x(f) = 2\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{\pi^2 f^2}{\alpha}}, \quad (8)$$

$$R_x(\tau) = e^{-\alpha\tau^2}. \quad (9)$$

Для приведенных выше моделей $E_x = 1$.

Выразим параметр α в выражениях (6) – (9) через максимальную частоту спектра F_m , используя уравнение (1).

RC-фильтр

$$\int_0^{F_m} \frac{4\alpha}{\alpha^2 + 4\pi^2 f^2} df = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\pi}{\alpha} F_m = p; \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\operatorname{tg} \frac{\pi}{2} p} F_m = K_p F_m,$$

где K_p – коэффициент пропорциональности.

Определим численные значения коэффициента K_p для конкретных величин параметра p :

$$\begin{aligned} p = 0,9; \quad \alpha = F_m; \quad K_{0,9} = 1; \\ p = 0,95; \quad \alpha = 0,5F_m; \quad K_{0,95} = 0,5; \\ p = 0,99; \quad \alpha = 0,1F_m; \quad K_{0,99} = 0,1. \end{aligned} \quad (11)$$

Гауссов ФНЧ

$$\int_0^{F_m} 2\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{\pi^2 f^2}{\alpha}} df = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{t_m} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 2\Phi_o(t_m) = p, \quad (12)$$

где $t = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \pi f$; $\Phi_o(t_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_m} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – функция распределения нормированного нормального закона:

$$\alpha = \frac{2\pi^2}{t_m^2} F_m^2 = K_p^2 F_m^2. \quad (13)$$

Аналогичным образом, подставив конкретные значения параметра p в выражения (12) и используя табулированность функции $\Phi_o(t_m)$ с учетом (13), определим численные значения для коэффициентов пропорциональности K_p :

$$\begin{aligned} p = 0,9; \quad \alpha = 7,25F_m^2; \quad K_{0,9} = 2,69; \\ p = 0,95; \quad \alpha = 5,14F_m^2; \quad K_{0,95} = 2,27; \\ p = 0,99; \quad \alpha = 2,96F_m^2; \quad K_{0,99} = 1,72. \end{aligned} \quad (14)$$

Для нахождения аналитических зависимостей $F_o = F_o(\gamma_{Вм}, F_m)$ в явном виде при восстановлении процесса $x(t)$ с помощью ИНП и ИПП в формулы (2) и (3) нужно подставить выражения для корреляционных функций (5), (7) и (9) с учетом (10), (13), а полученные уравнения решить относительно $F_o = 1/T_o$.

Восстановление исходного процесса с помощью интерполятора нулевого порядка

Из выражения (2) следует

$$R_x(T_o/2) = 1 - 0,0018\gamma_{Вм}^2. \quad (15)$$

1. Модель вида (4), (5) – ИФНЧ.

Подставив (5) в (15) при $\tau = T_o/2$, получим

$$\frac{\sin \pi F_m T_o}{\pi F_m T_o} = 1 - 0,0018\gamma_{Вм}^2.$$

Точное значение $F_o = 1/T_o$ при заданных F_m и $\gamma_{Вм}$ можно определить с помощью табличного представления функции $\frac{\sin z}{z}$, где $z = \pi F_m T_o$.

Используя разложение $\frac{\sin z}{z} \cong 1 - \frac{z^2}{3!}$ при $z \leq \frac{\pi}{2}$, получаем приближенную формулу для расчета F_o

$$F_o = 30,2 \frac{F_m}{\gamma_{Вм}}. \quad (16)$$

2. Модель вида (6), (7) – RC-фильтр.

Из формул (15), (7) и (10) следует

$$e^{-K_p F_m |T_o/2|} = 1 - 0,0018\gamma_{Вм}^2.$$

Отсюда

$$F_o = \frac{K_p F_m}{2 \ln(1 - 0,0018\gamma_{Вм}^2)^{-1}},$$

где K_p определяется с помощью уравнения (11).

Используя разложение $\ln(1-z)^{-1} \cong z + \frac{z^2}{2}$, где $z = 0,0018\gamma_{Вм}^2$, $z \ll 1$ для практических значений $\gamma_{Вм}$, получаем

$$F_o = 277,8 \frac{K_p F_m}{\gamma_{Вм}^2}. \quad (17)$$

3. Модель вида (8), (9) – гауссов ФНЧ.

Из формул (15), (9) и (13) следует

$$e^{-K_p^2 F_m^2 |T_o/2|^2} = 1 - 0,0018\gamma_{Вм}^2.$$

Отсюда

$$F_o = \frac{K_p F_m}{2 \sqrt{\ln(1 - 0,0018\gamma_{Вм}^2)^{-1}}},$$

где K_p определяется с помощью уравнения (14).

Используя разложение логарифмической и степенной функции в ряд и ограничившись первыми двумя членами, получаем

$$F_o = 11,8 \frac{K_p F_m}{\gamma_{Bm}}. \quad (18)$$

Восстановление исходного процесса с помощью интерполятора первого порядка

Из выражения (2) следует

$$R_x(T_o) - 4R_x(T_o) + 3 = 0,0072\gamma_{Bm}^2. \quad (19)$$

1. Модель вида (4), (5) – ИФНЧ.

Подставив выражение (5) в (19) при $\tau = T_o$ и используя разложение $\frac{\sin z}{z} \cong 1 + a_2 z^2 + a_4 z^4$ при $z \leq \frac{\pi}{2}$, где $a_2 = -0,16605$; $a_4 = 0,00761$ [5], получим приближенное выражение для частоты опроса

$$F_o = 5,9 \frac{K_p F_m}{\sqrt{\gamma_{Bm}}}. \quad (20)$$

2. Модель вида (6), (7) – RC-фильтр.

Подставляя выражение (7) с учетом (10) в (19) и используя разложение $e^{-z} \cong 1 + a_1 z + a_2 z^2$, где $a_1 = 0,9664$; $a_2 = 0,3536$, $z \leq \ln 2$ [5], получаем

$$F_o = 134,1 \frac{K_p F_m}{\gamma_{Bm}^2}, \quad (21)$$

где K_p определяется с помощью уравнения (11).

3. Модель вида (8), (9) – гауссов ФНЧ.

Используя уравнения (9), (13) и разложение для показательной функции в выражении (19) соответственно получаем

$$F_o = 3,2 \frac{K_p F_m}{\sqrt{\gamma_{Bm}}}. \quad (22)$$

где K_p определяется с помощью формулы (14).

Приближенные выражения для оценки частоты опроса непрерывных сообщений, представленных моделями (4) – (9), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Приближенные выражения для оценки частоты опроса непрерывных сообщений

Метод восстановления	Частота опроса F_o , Гц		
	ИФНЧ	RC-фильтр	Гауссов ФНЧ
ИНП	$30,2 \frac{F_m}{\gamma_{Bm}}$	$277,8 \frac{K_p F_m}{\gamma_{Bm}^2}$	$11,8 \frac{K_p F_m}{\gamma_{Bm}}$
ИПП	$5,9 \frac{F_m}{\sqrt{\gamma_{Bm}}}$	$134,1 \frac{K_p F_m}{\gamma_{Bm}^2}$	$3,2 \frac{K_p F_m}{\sqrt{\gamma_{Bm}}}$

При этом погрешность приближения для $\gamma_{Bm} \leq 5\%$ не превышает 0,3% от точного значения F_o .

Заключение

Определение максимальной частоты спектра F_m исходного процесса с помощью выражения (1) позволяет наряду с физической ясностью в оценке F_m подойти к анализу дискретного представления различных моделей непрерывных сообщений с единых энергетических и точностных позиций. Введение коэффициента пропорциональности K_p , соответствующего 100р-процентному количеству мощности исходного процесса, заключенному в интервале частот $[0, F_m]$, позволяет выразить параметр α , характеризующий форму энергетического спектра и корреляционной функции первичного сообщения в рамках выбранной модели, через величины K_p и F_m . При этом отпадает необходимость в использовании других параметров энергетического спектра, таких как эффективное значение спектра, ширина спектра на уровне 0,707, 50%, 25% мощности и т.д. [6, 7].

Библиографический список

1. Лоскутов, А. И. Телеметрия / А. И. Лоскутов, А. А. Бянкин, Г. И. Козырев [и др.]. – Санкт-Петербург : Изд-во ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – 343 с.
2. Современная телеметрия в теории и на практике / А. В. Назаров, Г. И. Козырев, И. В. Шитов, В. П. Обрученков, А. В. Древин, В. Б. Краскин [и др.]. – Санкт-Петербург : Наука и техника, 2007. – 667 с.
3. Новоселов, О. М. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О. М. Новоселов, А. Ф. Фомин. – 2-е изд. – Москва : Машиностроение, 1991. – 336 с.
4. Новоселов, О. М. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О. М. Новоселов, А. Ф. Фомин. – Москва : Машиностроение, 1980. – 280 с.
5. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1974. – 832 с.
6. Самойлов, Л. К. Выбор частоты дискретизации реальных сигналов / Л. К. Самойлов, А. В. Жуков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 1. – С. 29–31.
7. Кошевой, А. А. Телеметрические комплексы летательных аппаратов / А. А. Кошевой. – Москва : Машиностроение, 1975. – 312 с.

References

1. Loskutov A. I., Byankin A. A., Kozyrev G. I. et al. *Telemetriya* [Telemetry]. Saint-Petersburg: Izd-vo VKA im. A. F. Mozhayskogo, 2017, 343 p. [In Russian]
2. Nazarov A. V., Kozyrev G. I., Shitov I. V., Obruchenkov V. P., Drevin A. V., Kraskin V. B. et al. *Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike* [Modern telemetry in theory and practice]. Saint-Petersburg: Nauka i tekhnika, 2007, 667 p. [In Russian]
3. Novoselov O. M., Fomin A. F. *Osnovy teorii i rascheta informatsionno-izmeritel'nykh sistem* [Fundamentals of the theory and calculation of information and measurement systems]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 336 p. [In Russian]
4. Novoselov O. M., Fomin A. F. *Osnovy teorii i rascheta informatsionno-izmeritel'nykh sistem* [Fundamentals of the theory and calculation of information and measurement systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 280 p. [In Russian]
5. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Reference book on mathematics (for scientists and engineers)]. Moscow: Nauka, 1974, 832 p. [In Russian]
6. Samoylov L. K., Zhukov A. V. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics]. 2009, no. 1, pp. 29–31. [In Russian]
7. Koshevoy A. A. *Telemetricheskie komplekсы letatel'nykh apparatov* [Telemetry systems of aircraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 312 p. [In Russian]

Козырев Геннадий Иванович

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

Kozyrev Gennadiy Ivanovich

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

Кравцов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
начальник кафедры метрологического обеспечения
вооружения, военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: kan1970@bk.ru

Kravcov Aleksandr Nikolaevich

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

Усиков Валентин Дмитриевич

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

Usikov Valentin Dmitrievich

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

Образец цитирования:

Козырев, Г. И. Расчет частоты опроса в многоканальных информационно-измерительных системах с единых энергетических и точностных позиций / Г. И. Козырев, А. Н. Кравцов, В. Д. Усиков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 14–21. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-2.

А. С. Ефремов, А. С. Швед, Л. В. Лукичев

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОВЕРОЧНЫХ ОРГАНОВ

A. S. Efremov, A. S. Shved, L. V. Lukichev

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL DISTRIBUTED SYSTEM OF INSPECTION BODIES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность темы обусловлена важностью задач обеспечения оперативности и экономичности выполнения поверочно-аттестационных работ и в связи с этим необходимостью оценивания показателей качества поверочных работ применительно к распределенной структуре источников неоднородных потоков заявок на поверку и поверочных органов. Целью работы является разработка модели функционирования распределенной системы поверочных органов, в которой учитываются как характеристики потоков заявок на обслуживание, так и основные структурные и функциональные параметры системы поверочных органов. **Результаты.** Рассмотрен подход к построению модели функционирования территориально распределенной системы поверочных органов на основе использования математического аппарата локально сбалансированных замкнутых неоднородных сетей массового обслуживания. Приведено описание модели и основные расчетные соотношения для определения нагрузочных и вероятностно-временных характеристик процессов поверки средств измерений и функционирования поверочных органов на примере моделей обслуживания в одноуровневой распределенной системе поверочных органов. **Выводы.** Использование модели позволит определить основные показатели качества выполнения поверочных работ с учетом как состава и характеристик подлежащих поверке средств измерений, так и структуры и особенностей функционирования поверочных органов. Рассмотренную модель можно использовать при решении оптимизационных задач по организации и планированию поверочно-аттестационных работ в распределенной системе поверочных органов.

A b s t r a c t. Background. The relevance of the topic of work is due to the uneven distribution of the flow of applications to verification bodies without taking into account their structural and functional parameters. The aim of the work is to develop a model for the functioning of a distributed system of calibration bodies, which takes into account the number and types of jobs in each calibration body, traffic routes and the procedure for servicing applications. **Results.** The approach to building a model of the functioning of a geographically distributed system of calibration bodies based on the use of the mathematical apparatus of locally balanced closed heterogeneous queuing networks is considered. A description of the model and the basic design relationships for determining the load and probability-time characteristics of the calibration processes of measuring instruments and the functioning of calibration bodies are given on the example of service models in a single-level distributed system of calibration bodies. **Conclusion.** Using the model will allow us to determine the main indicators of the quality of verification work, taking into account both the composition and characteristics of the measuring instruments to be verified, and the structure and features of the functioning of calibration bodies. The considered model can be used to solve optimization problems in organizing and planning verification and certification work in a distributed system of calibration bodies.

К л ю ч е в ы е с л о в а: поверочные органы, распределение заявок, поверка средств измерений, сеть массового обслуживания, оперативность, качество поверочных работ.

K e y w o r d s: distribution of applications, verification of measuring instruments, queuing network, efficiency, optimization, quality of verification work.

Введение

В сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений (ГРОЕИ) к применению допускаются средства измерений (СИ) утвержденного типа, прошедшие поверку [1]. В целях обеспечения единства измерений при поверке реализуется процедура передачи размера единиц величин средствам измерений от рабочих эталонов.

Поверка средств измерений и аттестация рабочих эталонов производятся в аккредитованных в соответствии с законодательством РФ на право проведения поверки средств измерений организациях, входящих в структуру государственной и ведомственных метрологических служб, – поверочных органах. Поверка СИ в общем случае может осуществляться как в самих поверочных органах, так и непосредственно в местах эксплуатации СИ выездными метрологическими группами с применением подвижных поверочных лабораторий и комплексов.

При организации и планировании поверочно-аттестационных работ, как правило, используется территориальный принцип с учетом сложившейся структуры ведомственной метрологической службы. При невозможности или экономической нецелесообразности проведения поверки СИ (аттестации эталонов) в ведомственных метрологических органах эти работы могут выполняться в аккредитованных на право поверки средств измерений сторонних организациях.

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми при организации поверочно-аттестационных работ, являются требования оперативности и экономичности. Требование оперативности подразумевает обеспечение своевременности поверочно-аттестационных работ и минимальной продолжительности нахождения СИ в поверочных органах (с учетом времени доставки и ожидания). Под требованием экономичности подразумевается необходимость сокращения затрат как, собственно, на проведение поверочно-аттестационных работ, так и затрат, связанных с потерями от отсутствия средств измерений в местах эксплуатации и невозможности их применения для решения целевых задач.

Показатели оперативности наиболее полно отражают степень соответствия качества организации поверочно-аттестационных работ с точки зрения обеспечения возможностей по целевому использованию средств измерений и эталонов. От значений показателей оперативности во многом зависят и экономические показатели поверочно-аттестационных работ. Поэтому при оценивании качества организации и планирования поверочно-аттестационных работ, при обосновании структуры и порядка функционирования поверочных подразделений необходим расчет показателей оперативности, который может быть выполнен на основе математической модели функционирования распределенной системы поверочных органов.

Содержательная постановка задачи

Будем рассматривать множество территориально распределенных организационно-технических объектов, в составе каждого из которых эксплуатируется множество средств измерений различных типов, обеспечивающих метрологическое обслуживание техники.

Имеется также множество подразделений ведомственных и государственной метрологических служб, в которых в соответствии с имеющейся областью аккредитации может производиться поверка средств измерений, а также аттестация рабочих эталонов.

В общем случае будем полагать, что метрологическая служба имеет иерархическую структуру, в которой на нижнем уровне располагаются подразделения, имеющие ограниченные возможности по проведению поверки (оснащены ограниченным набором рабочих эталонов низких разрядов), а на более высоких уровнях – подразделения с более широкими возможностями по проведению поверочных и аттестационных работ (более широкая номенклатура средств поверки, более высокие по поверочной схеме разряды эталонов).

Средства измерений для проведения поверки преимущественно направляются в ближайшие поверочные органы нижнего уровня с учетом имеющихся у них областей аккредитации. В случае невозможности или нецелесообразности выполнения поверки в ближайшем подразделении средства измерений направляются в другое аккредитованное поверочное подразделение.

При такой организации поверочно-аттестационных работ значения показателей оперативности определяются как составом обслуживаемых объектов (число и типы поверяемых СИ), так и структурными и функциональными параметрами системы поверочных органов (территориальное расположение, область аккредитации, количество и типы рабочих мест, распределение нагрузки между поверочными органами, порядок обслуживания и пр.).

При этом значения отдельных показателей оперативности поверки различных средств измерений оказываются взаимозависимыми, поскольку события, характеризующие смену состояний объектов системы, являются взаимозависимыми через общие каналы обслуживания.

Для построения модели поверочных органов может быть использован математический аппарат сетей массового обслуживания [2–4], с применением которого возможно определить показатели оперативности поверочно-аттестационных работ с учетом как характеристик потока заявок средств измерений на обслуживание, так и структурных и функциональных параметров системы поверочных органов.

Математическая модель

В общем случае рассматриваемая совокупность объектов обслуживания и поверочных органов может быть представлена в виде иерархической модели, число уровней в которой может быть различным в зависимости от рассматриваемого состава обслуживаемых объектов и структуры подразделений метрологической службы. При построении модели рассмотрим наиболее простой случай – одноуровневое обслуживание. В этом случае имеется множество групп средств измерений – объектов обслуживания и множество поверочных органов одного уровня.

Такую структуру можно представить в виде двухуровневой сети массового обслуживания (СеМО), которая состоит из $K = N + M$ систем массового обслуживания (СМО). При этом $СМО_n$ ($n = \overline{1, N}$) описывают процессы формирования заявок на проведение поверок, а остальные $СМО_m$ ($m = \overline{1, M}$) описывают процессы функционирования поверочных органов по обслуживанию этих заявок, т.е. выполнение поверочных работ.

Определим основные параметры рассматриваемой модели.

Каждая из $СМО_n$ ($n = \overline{1, N}$) соответствует отдельному объекту, на котором эксплуатируется множество СИ определенного типа h_n , $n = \overline{1, N}$, образующих поток заявок на обслуживание в поверочном органе.

Под однотипными СИ в данной модели целесообразно понимать такое множество СИ, обслуживание которых может выполняться на одном рабочем месте (или однотипных рабочих местах). Например, один тип – средства измерения давления, другой тип – средства измерений электрических величин и т.п. При этом процессы формирования и обслуживания заявок для средств измерений разных типов не связаны друг с другом, поэтому в рамках данного подхода их целесообразно моделировать отдельными СеМО.

Будем рассматривать случай, когда в определенной структуре циркулирует фиксированное число заявок, а внешний независимый источник заявок отсутствует, т.е. рассматриваемая СеМО в этом случае является замкнутой. Число постоянно циркулирующих в сети заявок H в этом случае соответствует суммарному числу средств измерений в рассматриваемой структуре:

$$H = \sum_{n=1}^N h_n. \quad (1)$$

В составе каждого потока заявок на обслуживание могут быть заявки разных классов, соответствующие средствам измерений и различающиеся хотя бы по одному из признаков: приоритетами обслуживания, параметрами распределения длительности обслуживания в уз-

лах, и маршрутами движения по сети. В этом случае рассматриваемая СеМО является неоднородной.

Поток заявок на обслуживание в поверочном органе характеризуется некоторой интенсивностью, которая может быть определена через средние длительности межповерочных интервалов (МПИ) соответствующих групп средств измерений.

Интенсивность потока заявок на обслуживание Λ_n , выходящего из каждой СМО _{n} ($n = \overline{1, N}$), и моделирующего процессы формирования заявок на поверочные работы, в общем случае определяется как

$$\Lambda_n = \sum_{k=1}^{h_n} \lambda_k, \quad (2)$$

где λ_k ($k = \overline{1, h_n}$) – интенсивность потока заявок от k -го средства.

При этом $\lambda = 1/T_n$, где T_n – средний интервал времени между двумя последовательными заявками.

В случае, когда в составе СМО _{n} имеется R_n различных классов заявок, а в каждом классе имеется h_{nr} ($r = \overline{1, R}$) заявок с одинаковыми интенсивностями λ_r , интенсивность суммарного потока заявок на обслуживание от n -го объекта определится как

$$\Lambda_n = \sum_{r=1}^{R_n} h_{nr} \lambda_r. \quad (3)$$

Каждая из СМО _{m} ($m = \overline{1, M}$) соответствует отдельному поверочному органу, в составе которого имеется конечное число рабочих мест по поверке g_m , $m = \overline{1, M}$, на которых может обслуживаться некоторое подмножество СИ определенных типов в соответствии с областью аккредитации и оснащенностью рабочего места.

Каждое рабочее место характеризуется некоторым параметром производительности обслуживания заявок определенного класса – интенсивностью обслуживания μ_r ($r = \overline{1, R}$), связанной для каждого класса заявок со средним временем выполнения поверки τ_n соотношением $\mu = 1/\tau_n$. В случае, когда в составе поверочного органа имеется g одинаковых рабочих мест для поверки СИ (каналов обслуживания), суммарная интенсивность обслуживания однотипных заявок определяется произведением $g\mu$.

В зависимости от установленной организации поверочных работ возможны две основные схемы обслуживания – централизованная и децентрализованная. При централизованной схеме обслуживания заявки на выполнение поверки СИ определенного типа всегда направляются только в конкретный поверочный орган, за которым эти объекты обслуживания административно закреплены. При децентрализованной схеме обслуживания отсутствует жесткое закреплениеверяемых СИ за конкретными поверочными органами, т.е. заявки на поверку могут направляться в любое из доступных на рассматриваемой территории поверочных подразделений, имеющих соответствующую область аккредитации.

Поверочные работы являются необезличенными, т.е. после завершения поверки средства измерений возвращаются в те места, откуда они поступили.

Примеры фрагментов СеМО для централизованной и децентрализованной схем обслуживания приведены на рис. 1, а и б соответственно.

Возможные направления движения заявок по сети описываются с помощью маршрутной матрицы $P = p_{ij}$, $i, j = \overline{1, K}$, компоненты которой p_{ij} представляют собой вероятности перехода заявки из СМО _{i} в СМО _{j} . При этом элементы матрицы вероятностей переходов должны удовлетворять условию

$$\sum_{j=1}^K p_{ij} = 1, \quad (i = \overline{1, K}). \quad (4)$$

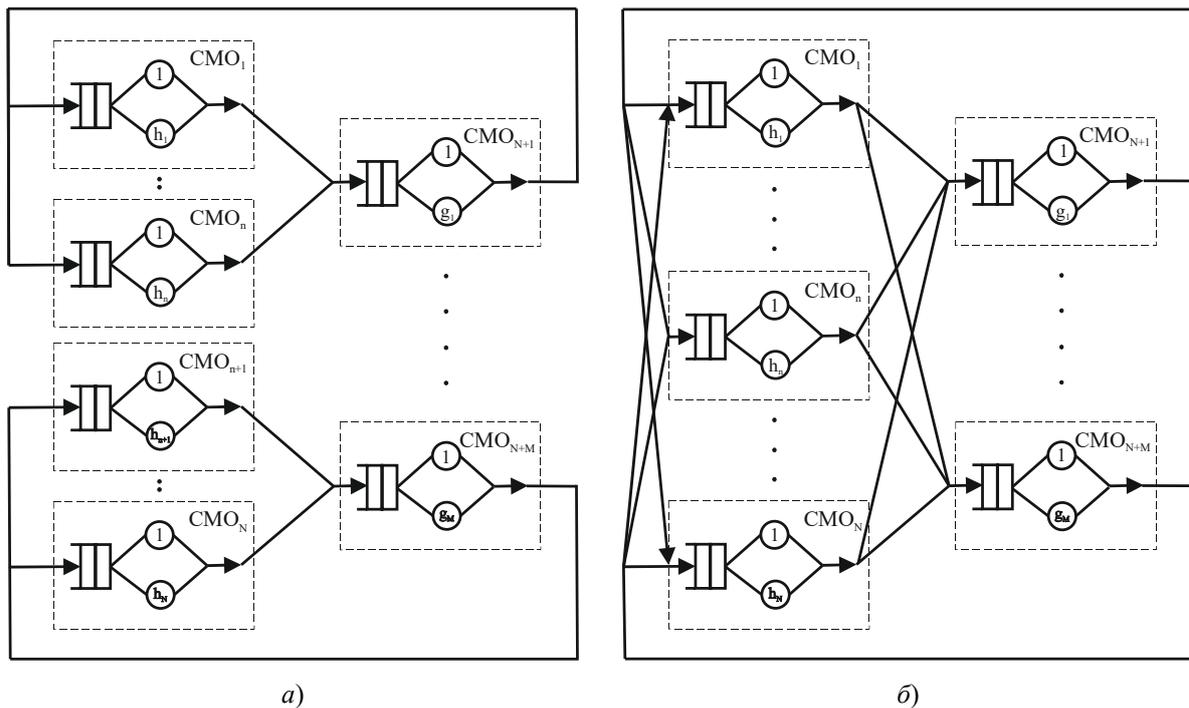


Рис. 1. Фрагмент СеМО при одноуровневом обслуживании:
 а – централизованная схема; б – децентрализованная схема

Данное условие отражает тот факт, что любая заявка, покинувшая некоторый узел, обязательно перейдет в какой-либо другой узел, причем все возможные переходы составляют полную группу событий.

Очевидно, что для централизованной схемы обслуживания (см. рис 1,а) значения вероятностей переходов заявок на обслуживание в поверочные органы могут принимать лишь два значения – 0 и 1. При этом в случае распределения заявок, подобного приведенному на рис. 1,а, каждый поверочный орган с закрепленными за ним объектами обслуживания имеет смысл рассматривать как отдельную СеМО.

Важным параметром модели СеМО является дисциплина обслуживания заявок в узлах.

Функционирование каждой из $СМО_n$ ($n = \overline{1, N}$) может быть описано системой, в которой число обслуживающих приборов не менее числа заявок на обслуживание с беспriorитетной дисциплиной обслуживания.

В поверочных органах число рабочих мест (каналов обслуживания), как правило, меньше числа объектов, которые могут одновременно поступить на поверку. Будем полагать, что поверочные органы описываются как системы с накопителем неограниченной емкости (СМО без потерь), т.е. в общем случае в поверочном органе возможно образование очередей, а отказов в обслуживании не происходит.

С учетом этого возможно применение различных дисциплин обслуживания (например, *FIFO*, *LIFO*, *RAND*), а также возможно обслуживание с учетом приоритетов. К примеру, в первоочередном порядке могут поверяться СИ, применяемые для особо ответственных задач, когда наиболее высока возможность и тяжесть ущерба из-за отсутствия поверенного средства измерений. Для таких классов СИ может быть назначен более высокий приоритет в обслуживании в сравнении с другими средствами.

Рассмотрим основные характеристики процессов поверки СИ и функционирования поверочных органов, которые могут быть определены с использованием представленной модели СеМО.

Характеристики рассматриваемой модели СеМО являются случайными величинами, которые наиболее полно могут быть описаны соответствующими законами распределений вероятностей. Будем рассматривать установившийся (стационарный) режим функционирования СеМО, при котором вероятностные характеристики не изменяются во времени. Применительно к стационарному режиму функционирования с использованием известных соотношений из тео-

рии массового обслуживания могут быть определены основные нагрузочные и вероятностно-временные характеристики процессов поверки СИ и функционирования поверочных органов.

Интенсивность потока заявок на обслуживание, поступающего в поверочный орган (т.е. в каждую из СМО_{*m*} ($m = \overline{1, M}$)), определяется с учетом величин интенсивностей исходящих потоков заявок на обслуживание и вероятностей переходов.

Для случая, когда заявки разных классов, исходящие от одного объекта, не различаются маршрутами:

$$\Lambda_m = \sum_{n=1}^N \Lambda_n p_{nm}, \quad (5)$$

где Λ_m – суммарная интенсивность потока заявок на обслуживание, поступающих в СМО_{*m*} ($m = \overline{1, M}$); Λ_n – суммарная интенсивность потока заявок на обслуживание, исходящих из СМО_{*n*} ($n = \overline{1, N}$); p_{nm} – вероятности перехода заявок из СМО_{*n*} в СМО_{*m*}.

В случае, когда заявки разных классов от разных объектов могут направляться для обслуживания в один поверочный орган:

$$\Lambda_m = \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^{R_n} h_{nr} \lambda_r p_{nm}. \quad (6)$$

При этом суммарная интенсивность потока заявок *r*-го класса, поступающих от всех объектов на обслуживание в *m*-й поверочный орган Λ_{mr} , определяется выражением

$$\Lambda_{mr} = \sum_{n=1}^N h_{nr} \lambda_r p_{nm}. \quad (7)$$

При известных интенсивностях потоков заявок и интенсивностях обслуживания заявок каждого класса может быть определен коэффициент загрузки *m*-го поверочного органа:

$$\rho_m = \frac{1}{g_m} \sum_{r=1}^R \frac{\Lambda_{mr}}{\mu_{mr}}, \quad (8)$$

где g_m – число однотипных рабочих мест в *m*-м поверочном органе, а μ_{mr} – интенсивность обслуживания заявок *r*-го класса в *m*-м поверочном органе.

Коэффициент загрузки в стационарном режиме характеризует среднее значение доли времени, в течение которой канал занят или вероятность того, что канал занят. Также коэффициент загрузки характеризует среднее число заявок, находящихся на обслуживании на одном рабочем месте. Соответственно, величина $1 - \rho$ может характеризовать вероятность или долю времени простоя канала обслуживания.

Важнейшей характеристикой сети массового обслуживания является вероятность их состояний. Состояние рассматриваемой СеМО может быть описано матрицей распределения заявок по сети вида $H = h_{kr}$, компоненты которой h_{kr} представляют собой число заявок класса *r*, ($r = \overline{1, R}$), находящихся в СМО_{*k*} ($k = \overline{1, K}$). Тогда матрица-столбец вида $h_{k*} = h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{kR}$ характеризует число заявок каждого класса в конкретной СМО_{*k*}.

С учетом принятого определения состояния сети вероятность нахождения рассматриваемой системы в произвольно заданном состоянии H_{**} определяется известным из теории СеМО выражением

$$P(H_{**}) = F^{-1} \prod_{k=1}^K P_k(h_{k*}), \quad (9)$$

где F – нормализующая константа, определяемая на множестве всех возможных состояний сети Ψ выражением

$$F = \sum_{\Psi} \prod_{k=1}^K P_k(h_{k*}). \quad (10)$$

При этом функция P_k есть вероятность того, что СМО $_k$ находится в состоянии h_{k*} , при котором в ней имеется точно $h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{kR}$ заявок. Вид функции P_k определяется в зависимости от используемой дисциплины обслуживания с учетом характеристик потока заявок.

Знание значений вероятностей состояний позволяет определять интересующие вероятностные характеристики процессов обслуживания. Например, вероятность того, что в произвольный момент времени заданное количество СИ окажется не в поверочном органе, а на своих штатных рабочих местах, может быть определена как сумма вероятностей всех таких состояний СеМО, для которых такое условие выполняется.

В качестве показателей оперативности целесообразно использовать временные показатели, характеризующие как суммарное время нахождения СИ в поверочных органах, так и отдельные составляющие процесса обслуживания СИ (время доставки, время ожидания в очереди, собственно, время поверки).

Время нахождения СИ в поверочном органе складывается из двух основных составляющих: собственно времени поверки τ_n и времени ожидания в очереди $\tau_{ож}$ по причине отсутствия свободных рабочих мест, т.е. время пребывания заявки r -го класса в СМО $_m$ определяется суммой времени обслуживания заявки и времени ожидания свободного канала обслуживания: $\tau_{mr} = \tau_{n_{mr}} + \tau_{ож_{mr}}$. Время выполнения операций поверки определяется установленными для каждого средства измерений нормами времени, а также оснащенностью рабочих мест. А время нахождения в очереди в существенной степени определяется принятой стратегией представления СИ на поверку. К примеру, если организовать процессы поступления и обслуживания заявок как детерминированные, и при этом СИ представлять на поверку строго поочередно, то теоретически при соответствующей интенсивности обслуживания очереди на поверку может не образовываться вообще. На практике же в силу многих причин процессы поступления и обслуживания заявок являются во времени случайными. Кроме того, для многих организаций и ведомств характерным является представление СИ на поверку партиями. Эти обстоятельства на практике приводят к возникновению очереди на обслуживание случайной длины.

Средняя длина очереди из заявок r -го класса в m -м поверочном органе может быть определена с использованием формулы Литтла:

$$l_{mr} = \Lambda_{mr} \tau_{ож_{mr}}. \quad (11)$$

Соответственно, среднее число средств измерений r -го класса, находящихся в m -м поверочном органе (в очереди и на обслуживании), определяется выражением

$$H_{mr} = \Lambda_{mr} \tau_{mr}. \quad (12)$$

Общая средняя длина очереди и число заявок в поверочном органе могут быть определены суммированием по всем классам заявок.

Таким образом, с использованием рассмотренной модели могут быть определены основные показатели качества выполнения поверочных работ с учетом как состава и характеристик подлежащих поверке средств измерений, так и структуры и особенностей функционирования поверочных органов. В составе параметров структурного построения системы поверочных органов учитываются число и типы распределенных поверочных органов, число и характеристики рабочих мест в каждом из них. Функциональные параметры задаются в виде конкретных стратегий управления потоками заявок в сети массового обслуживания, определяющих маршруты движения заявок разных классов по сети, правила организации очереди и порядок обслуживания.

Заключение

Структурно-функциональная модель распределенной системы поверочных органов представлена в виде замкнутой неоднородной сети массового обслуживания, параметры которой определяются применительно к стационарному режиму функционирования системы.

Возможности применения подобной модели рассмотрены в данной статье на примере организации одноуровневого обслуживания в системе поверочных органов.

Дальнейшее развитие рассмотренного подхода возможно в следующих направлениях:

– построение модели многоуровневого обслуживания, в том числе с использованием ресурсов сторонних поверочных органов, на основе разомкнутых или комбинированных сетей массового обслуживания;

– учет не только процессов поверки средств измерений, но и процессов аттестации эталонов, имеющихся в составе поверочных органов.

Данные модели могут быть использованы как для оценки качества построения и функционирования системы поверочных органов, так и при решении оптимизационных задач по организации и планированию поверочно-аттестационных работ в распределенной системе поверочных органов.

Библиографический список

1. Об обеспечении единства измерений : федер. закон № 102-ФЗ от 26.06.2008.
2. Жожикашвили, В. А. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ / В. А. Жожикашвили, В. М. Вишневецкий. – Москва : Радио и связь, 1988. – 192 с.
3. Зеленцов, В. А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи / В. А. Зеленцов, А. А. Гагин. – Ленинград : МО СССР, 1991. – 170 с.
4. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – Москва : Машиностроение, 1979. – 432 с.

References

1. *Ob obespechenii edinstva izmereniy: feder. zakon ot 26.06.2008 g. № 102-FZ* [About ensuring the uniformity of measurements: Feder. law No. 102-FZ of 26.06.2008]. [In Russian]
2. Zhzhikashvili V. A., Vishnevskiy V. M. *Seti massovogo obsluzhivaniya. Teoriya i primeneniye k setyam EVM* [Queueing network. Theory and application to computer networks]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 192 p. [In Russian]
3. Zelentsov V. A., Gagin A. A. *Nadezhnost', zhivuchest' i tekhnicheskoe obsluzhivanie setey svyazi* [Reliability, survivability and maintenance of communication networks]. Leningrad: MO SSSR, 1991, 170 p. [In Russian]
4. Kleynrok L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queueing theory]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 432 p. [In Russian]

Ефремов Андрей Станиславович

кандидат технических наук, доцент,
преподаватель,
кафедра метрологического
обеспечения вооружения, военной
и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: eas-spb@yandex.ru

Efremov Andrey Stanislavovich

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

Швед Андрей Сергеевич

начальник 1204 регионального центра
метрологии МО РФ
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Измайловский проспект, 13)
E-mail: AndrejShved76@yandex.ru

Shved Andrey Sergeevich

head of 1204 Regional Center of Metrology
of the Ministry of Defense
of the Russian Federation
(13 Izmailovskiy avenue, St. Petersburg, Russia)

Лукичев Леонид Викторович

адъюнкт,
кафедра метрологического обеспечения
вооружения, военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: leonid6196@mail.ru

Lukichev Leonid Viktorovich

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

Образец цитирования:

Ефремов, А. С. Структурно-функциональная модель распределенной системы поверочных органов / А. С. Ефремов, А. С. Швед, Л. В. Лукичев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 22–30. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-3.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.317.73

DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-4

*А. В. Светлов, Нгуен Нгок Мань*АМПЛИТУДНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ*A. V. Svetlov, Nguyen Ngoc Manh*AMPLITUDE DETECTOR FOR CONSTRUCTING
INSTRUMENTS TO MEASURE PARAMETERS
OF RESONANT ELECTRIC CIRCUITS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Представлены разработка и исследование амплитудного детектора, предназначенного для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей. **Материалы и методы.** Выбрана схема амплитудного детектора, разработаны стенд и методика для экспериментальных исследований детектора. **Результаты.** Выполнены экспериментальные исследования амплитудного детектора в диапазоне амплитуд переменного напряжения от 1,0 до 10,0 В и в диапазоне частот переменного напряжения от 20 до 500 кГц. **Выводы.** Исследуемый амплитудный детектор осуществляет преобразование амплитуды переменного напряжения синусоидальной формы в постоянное напряжение с относительной погрешностью не более $\pm 1\%$ в диапазоне амплитуд переменного напряжения от 5,0 до 10,0 В и в диапазоне частот переменного напряжения от 20 до 200 кГц. В расширенных диапазонах амплитуд и частот требуется дополнительное оценивание погрешности.

A b s t r a c t. Background. Development and research of an amplitude detector designed for constructing instruments to measure parameters of resonant electrical circuits. **Materials and Methods.** A circuit of the amplitude detector has been selected, and a stand and a technique for experimental studies of the detector have been developed. **Results.** Experimental studies of the amplitude detector in the range of alternating voltage amplitudes from 1.0 V to 10.0 V and in the frequency range of alternating voltage from 20 kHz to 500 kHz have been performed. **Conclusions.** The investigated amplitude detector converts the amplitude of alternating voltage of a sinusoidal shape to a constant voltage with a relative error of less than $\pm 1\%$ in the range of alternating voltage amplitudes from 5.0 V to 10.0 V and in the frequency range of alternating voltage from 20 kHz to 200 kHz. It is required additional error estimation in the extended ranges of amplitudes and frequencies.

К л ю ч е в ы е с л о в а: резонансная электрическая цепь, измерение параметров, амплитудный детектор, погрешность.

К e y w o r d s: resonant electric circuit, measurement of parameters, amplitude detector, error.

Среди разнообразных средств определения параметров многоэлементных электрических цепей особое место занимают измерительные преобразователи параметров резонансных электрических цепей или физических объектов (например, изделий из пьезоматериалов), представляемых эквивалентными резонансными электрическими схемами, отражающими поведение объектов в частотной области [1–3].

Для описания свойств резонансных электрических цепей необходимо определить параметры элементов (индуктивностей, емкостей, активных сопротивлений), входящих в состав цепи, а также частотные параметры: резонансную частоту и добротность, как отношение резонансной частоты к ширине резонансной кривой на уровне 0,707 от максимального напряжения на выходе измерительной цепи (ИЦ) на резонансной частоте.

Для определения параметров резонансных электрических цепей предложено использовать метод совокупных измерений [4], предполагающий решение системы уравнений, составленных с учетом измеренных значений резонансной частоты, добротности и максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте.

Методика совокупных измерений параметров резонансных цепей [5] должна предусматривать:

- поиск и измерение резонансной частоты;
- измерение максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте;
- измерение частот, соответствующих расстройке на уровне 0,707 от максимального напряжения на резонансной частоте;
- определение добротности по найденным значениям расстройки и резонансной частоты;
- определение параметров элементов резонансной электрической цепи в результате решения системы уравнений, полученных путем приравнивания математических выражений, описывающих резонансную частоту, добротность и выходное напряжение ИЦ, их измеренным значениям.

В состав средств измерений параметров резонансных электрических цепей должны входить следующие узлы:

1) генератор тестовых сигналов для формирования синусоидальных сигналов с частотой и амплитудой, перестраиваемыми в заданных диапазонах с высокими точностью и разрешением. Этим требованиям в полной мере отвечают программно управляемые DDS-генераторы [6];

2) измерительная цепь (ИЦ) на основе операционного усилителя, осуществляющая преобразование сопротивления исследуемого объекта в напряжение при подаче на вход ИЦ тестового синусоидального сигнала;

3) амплитудный детектор (АД), осуществляющий преобразование амплитуды выходного переменного напряжения ИЦ в постоянное напряжение;

4) средство измерения и регистрации полученного постоянного напряжения – цифровой вольтметр или АЦП, подключенный к компьютеру.

На результирующую погрешность измерителя параметров резонансных цепей оказывают влияние метрологические характеристики всех упомянутых выше узлов, входящих в состав измерителя, но, как показали проведенные авторами исследования, наибольший вклад в результирующую погрешность вносит неидеальность АД.

С целью проверки работоспособности, оптимизации режимов работы и экспериментального определения технических характеристик АД разработан и изготовлен стенд для исследования АД, схема которого приведена на рис. 1.

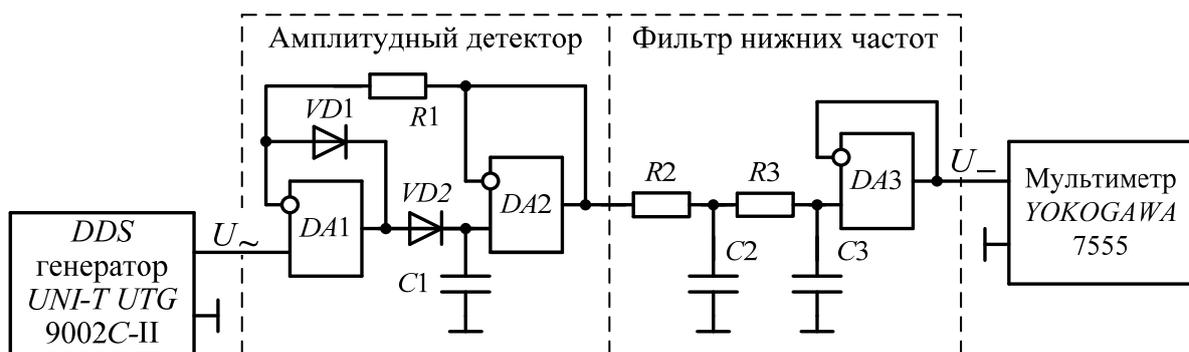


Рис. 1. Схема стенда для исследования АД

В качестве АД использована «классическая» двухкаскадная схема [7, 8]. В цепи обратной связи входного ОУ DA1 включен повторитель напряжения на ОУ DA2, используемый для развязки запоминающего конденсатора C1 и нагрузки. Используются ОУ 544УД2А с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде. Для уменьшения тока утечки запоминающего конденсатора C1 использован полистирольный конденсатор К71-7. Резистор R1 – тонкопленочный резистор С2-33 с низким температурным коэффициентом сопротивления и малым допускаемым отклонением сопротивления. Для уменьшения пульсаций выходного напряжения АД на его выходе включен фильтр нижних частот.

Для формирования синусоидальных тестовых сигналов используется DDS генератор UNI-T UTG9002C-II [9] с разрешением по частоте 1 мГц в диапазоне частот до 2 МГц и разрешением по амплитуде 1 мВ. Генератор имеет удобные органы управления для оперативного изменения частоты и амплитуды тестового сигнала.

Выходное постоянное напряжение измеряется с помощью цифрового мультиметра YOKOGAWA 7555 [10].

Разработана методика экспериментальных исследований АД, предусматривающая следующие действия:

1. Подготовить стенд для исследования АД к работе. Включить питание мультиметра и DDS генератора без подачи напряжения на его выходной разъем. Установить начальное значение амплитуды тестового синусоидального сигнала 1,0 В и начальное значение частоты 20,0 кГц. Прогреть приборы в течение времени, рекомендуемого Инструкциями по эксплуатации от производителей приборов.

2. Включить питание макета АД, после чего подать на вход АД тестовый синусоидальный сигнал с DDS генератора. Прогреть макет АД в рабочем режиме в течение 20 мин, необходимых для установления теплового режима ОУ 544УД2А в соответствии с рекомендациями [11].

3. С помощью цифрового мультиметра выполнить измерения постоянного выходного напряжения АД $U_{\text{ВЫХ}}$ при вариации задаваемой DDS генератором амплитуды $U_{m \text{ ВХ}}$ переменного входного напряжения в диапазоне от 1,0 до 10,0 В с шагом 0,2 В на каждой из частот f из ряда: 20; 50; 100; 150; 200; 300; 400; 500 кГц. По результатам измерений $U_{\text{ВЫХ}}$ при каждом значении $U_{m \text{ ВХ}}$ на каждой частоте f определить:

– коэффициент преобразования амплитуды переменного входного напряжения $U_{m \text{ ВХ}}$ в постоянное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$:

$$K = \frac{U_{m \text{ ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}; \quad (1)$$

– относительную погрешность преобразования амплитуды переменного входного напряжения $U_{m \text{ ВХ}}$ в постоянное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$:

$$\delta = \frac{U_{\text{ВЫХ}} - U_{m \text{ ВХ}}}{U_{m \text{ ВХ}}} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Для каждой частоты f построить графики амплитудных характеристик (АХ) АД – зависимостей коэффициента K преобразования амплитуды переменного входного напряжения в постоянное выходное напряжение от амплитуды $U_{m \text{ ВХ}}$ переменного входного напряжения, а также графики зависимостей погрешности δ от амплитуды $U_{m \text{ ВХ}}$.

4. Выполнить измерения постоянного выходного напряжения АД $U_{\text{ВЫХ}}$ при вариации задаваемой DDS генератором частоты f переменного входного напряжения в диапазоне от 20 до 500 кГц с шагом 10 кГц при следующих значениях амплитуды $U_{m \text{ ВХ}}$ переменного входного напряжения: 1,0; 2,0; 5; 10 В. По результатам измерений $U_{\text{ВЫХ}}$ при каждом значении частоты f и каждом выбранном значении амплитуды $U_{m \text{ ВХ}}$ определить значения коэффициента K и относительной погрешности δ по формулам (1) и (2). Построить графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) АД – зависимостей коэффициента K от частоты f переменного входного напряжения, а также графики зависимостей погрешности δ от частоты f .

В соответствии с изложенной методикой проведены экспериментальные исследования разработанного АД, по результатам которых построены АХ на заданных частотах f и АЧХ при заданных амплитудах $U_{m\text{вх}}$, а также графики зависимостей относительных погрешностей δ АХ и δ АЧХ от амплитуды и частоты в заданных диапазонах.

В качестве примера на рис. 2 приведены графики зависимостей относительной погрешности δ АХ от амплитуды $U_{m\text{вх}}$ в диапазоне от 1 до 10 В на частотах от 20 до 500 кГц.

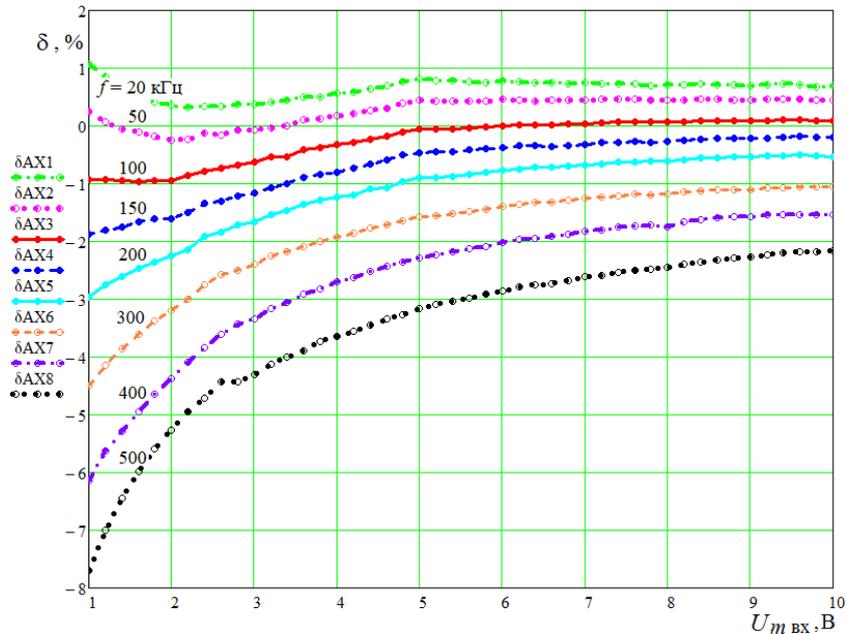


Рис. 2. Графики зависимостей относительной погрешности δ АХ от амплитуды $U_{m\text{вх}}$ в диапазоне от 1 до 10 В

Из приведенных графиков видно, что погрешность не более $\pm 1\%$ может быть обеспечена в диапазоне частот от 20 до 200 кГц и в диапазоне амплитуд от 5 до 10 В. Графики в этих диапазонах приведены на рис. 3.

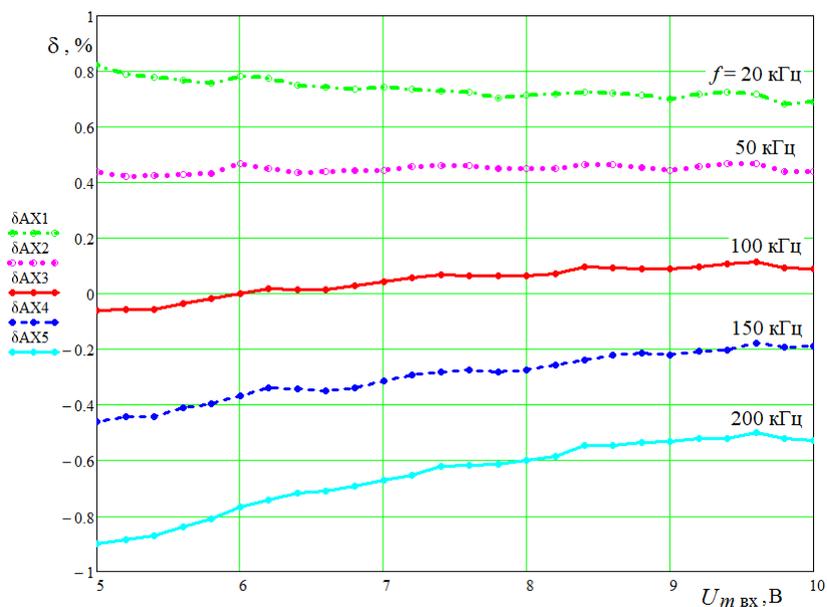


Рис. 3. Графики зависимостей относительной погрешности δ АХ от $U_{m\text{вх}}$ в диапазонах амплитуд от 5 до 10 В и частот от 20 до 200 кГц

Пример графиков зависимостей δ АЧХ от частоты приведен на рис. 4.

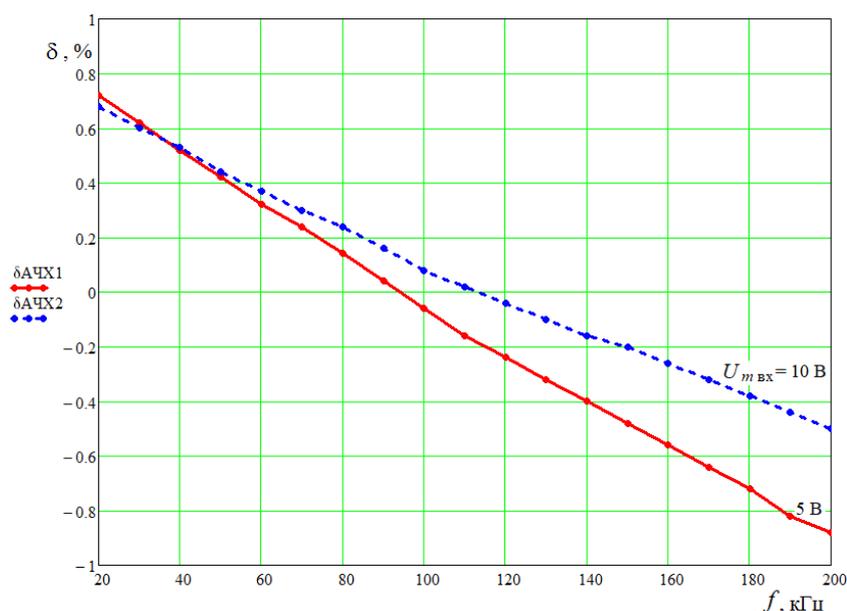


Рис. 4. Графики зависимостей относительной погрешности δ АЧХ от частоты в диапазоне частот от 20 до 200 кГц при амплитудах 5 и 10 В

Экспериментально подтверждена возможность расширения диапазона преобразуемых амплитуд $U_{m\text{вх}}$ до 12,0 В, но для оценивания получаемой погрешности требуются дополнительные исследования с применением аттестованного оборудования.

Заключение

По результатам выполненных экспериментальных исследований с применением промышленных средств измерений можно сделать следующие выводы о технических характеристиках разработанного АД:

1. АД осуществляет преобразование амплитуды переменного напряжения синусоидальной формы в постоянное напряжение с относительной погрешностью не более $\pm 1\%$ в диапазонах:

- амплитуд переменного напряжения от 5,0 до 10,0 В;
- частот переменного напряжения от 20 до 200 кГц.

В указанных диапазонах амплитуд и частот переменного напряжения разработанный АД может использоваться при совокупных измерениях параметров резонансных электрических цепей путем решения системы уравнений, составленных с учетом измеренных значений резонансной частоты, добротности исследуемой резонансной цепи и максимального напряжения на выходе ИЦ при резонансной частоте.

2. АД осуществляет преобразование амплитуды переменного напряжения синусоидальной формы в постоянное напряжение с ненормируемой (оцениваемой по результатам экспериментальных исследований действующего макета АД) погрешностью в расширенных диапазонах:

- амплитуд переменного напряжения от 1,0 до 12,0 В;
- частот переменного напряжения от 20 до 500 кГц.

В указанных диапазонах амплитуд и частот переменного напряжения разработанный АД может использоваться только для сравнительного оценивания амплитуд при поиске и измерении резонансной частоты исследуемой цепи.

Библиографический список

1. Кнеллер, В. Ю. Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. 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.

3. Чураков, П. П. Инвариантные измерители параметров катушек индуктивности / П. П. Чураков, Б. Л. Свистунов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1998. – 180 с.
4. Князьков, 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.
5. Колдов, А. С. Методика совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей / А. С. Колдов, А. В. Светлов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 22–23 мая 2019 г.) : в 2 т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – Т. 1. – С. 145–149.
6. Murphy, E. Direct Digital Synthesis (DDS). Controls Waveforms in Test, Measurement, and Communications / E. Murphy, C. Slattery // Analog Dialogue 39-08, August 2005. – URL: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-08/dds_apps.pdf.
7. Алексенко, А. Г. Применение прецизионных аналоговых ИС / А. Г. Алексенко, Е. А. Коломбет, Г. И. Стародуб. – Москва : Советское радио, 1980. – 224 с.
8. Пейтон, А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А. Дж. Пейтон, В. Волш. – Москва : Бинум, 1994. – 352 с.
9. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/.
10. YOKOGAWA 7555 Digital Multimeter. – URL: <http://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/2013/7555.pdf>.
11. Мониторинг частотных параметров операционных усилителей при работе в нестационарных тепловых режимах / Д. В. Артамонов, А. В. Князьков, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 37–43.

References

1. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opreделение parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determination of parameters of multielement two-terminal]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
2. Martyashin A. I., Kulikovskiy K. L., Kuroedov S. K., Orlova L. V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey* [Fundamentals of invariant transformation of electric circuit parameters]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 216 p. [In Russian]
3. Churakov P. P., Svistunov B. L. *Invariantnye izmeriteli parametrov katushek induktivnosti* [Invariant measuring the parameters of inductors]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 1998, 180 p. [In Russian]
4. Knyaz'kov A. V., Koldov A. S., Rodionova N. V., Svetlov A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 3 (25), pp. 69–78. [In Russian]
5. Koldov A. S., Svetlov A. V. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 22–23 maya 2019 g.): v 2 t.* [The problems of automation and control in technical systems : collection of articles on materials of the XXXIII Intern. scientific and technical conf. (Penza, may 22–23, 2019): in 2 vols.]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, vol. 1, pp. 145–149. [In Russian]
6. Murphy E., Slattery C. *Analog Dialogue 39-08, August 2005*. Available at: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-08/dds_apps.pdf.
7. Aleksenko A. G., Kolombet E. A., Starodub G. I. *Primenenie pretsizionnykh analogovykh IS* [Application of precision analog ICS]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980, 224 p. [In Russian]
8. Peyton A. Dzh., Volsh V. *Analogovaya elektronika na operatsionnykh usilitelyakh* [Analog electronics on operating amplifiers]. Moscow: Binom, 1994, 352 p. [In Russian]
9. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskie kharakteristiki* [Uni-T UTG9002C-II signal generator. Technical parameters]. Available at: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/. [In Russian]
10. YOKOGAWA 7555 *Digital Multimeter*. Available at: <http://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/2013/7555.pdf>.
11. Artamonov D. V., Knyaz'kov A. V., Parshukov M. Yu., Sapunov E. V., Svetlov A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 4 (22), pp. 37–43. [In Russian]

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

Svetlov Anatoliy Vil'evich

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

Нгуен Нгок Мань

аспирант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Nguyen Ngoc Manh

postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Светлов, А. В. Амплитудный детектор для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей / А. В. Светлов, Нгуен Нгок Мань // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 31–37. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-4.

*П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина, Т. А. Глебова,
А. Базарбай, А. В. Соколов, А. У. Аналиева*

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОДОРОДА. МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И БАЗОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

*P. G. Mikhaylov, L. A. Marinina, T. A. Glebova,
L. Bazarbay, A. V. Sokolov, A. U. Analieva*

SENSITIVE ELEMENTS OF HYDROGEN. CONVERSION METHODS AND BASIC CONSTRUCTS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Использование водорода в качестве экологически чистого и неисчерпаемого эффективного источника энергии в различных транспортных системах, в науке и технике является весьма актуальной задачей для всего человечества. В то же время для широкого использования водорода на практике крайне необходимо решить такие насущные проблемы, как его хранение, контроль утечек и предотвращение его самопроизвольного возгорания и взрыва. **Материалы и методы.** Выбраны методы преобразования и предложены конструкции пленочных и полупроводниковых элементов чувствительных к водороду (ЭЧВ), которые были использованы для контроля утечек водорода при его заправке в баки ракетно-космической системы «Бурани-Энергия». **Результаты.** Были разработаны и апробированы конструкции ЭЧВ на основе пленок палладий-серебро и полевых транзисторов, которые отличаются малыми габаритами и сниженным энергопотреблением. **Выводы.** Разработанные в результате проведения НИР конструктивные решения ЭЧВ и проверка их на испытательном стенде показали достаточную сходимость теоретических расчетов и результатов испытаний, что доказало целесообразность дальнейшего развития данного направления по созданию ЭЧВ.

A b s t r a c t. Background. The use of hydrogen as an environmentally friendly and inexhaustible efficient source of energy in various transport systems, in science and technology, is a very urgent task for all mankind. At the same time, for widespread use of hydrogen in practice, it is extremely necessary to solve such pressing problems as its storage, leak control and prevention of spontaneous combustion and explosion. **Materials and methods.** Conversion methods are Selected and designs of film and semiconductor elements of sensitive hydrogen (ESH) are proposed, which were used to control hydrogen leaks when it was refueled in the tanks of the Buran-Energiya rocket and space system. **Results.** We developed and tested ESH designs based on palladium-silver films and field-effect transistors, which are characterized by small dimensions and reduced energy consumption. **Conclusions.** The design solutions of ESH Developed as a result of research and testing on the test bench showed sufficient convergence of theoretical calculations and test results, which proved the feasibility of further development of this direction for creating ESH.

К л ю ч е в ы е с л о в а: водород, газ, чувствительный элемент, полевой транзистор, затвор, сенсор.

K e y w o r d s: hydrogen, gas, sensor element, field-effect transistor, gate, sensor.

Введение

Водородные технологии являются очень востребованными в промышленности, транспорте, экологии. Это связано с тем, что такие технологии не наносят вреда окружающей среде, на земле существуют неисчерпаемые запасы водорода, которые могут быть получены, например, путем электролиза обычной воды. Энергоемкость водорода на порядок выше, чем у традиционных углеводородов. Так, для космических аппаратов в настоящее время используются никель-водородные аккумуляторы, которые по техническим характеристикам превосходят остальные аккумуляторы. Но на пути применения водорода в технике и быту есть определенные трудности и ограничения, связанные с взрывоопасностью и утечками водорода, а также со сложностью его хранения. Для контроля утечек водорода требуются специализированные селективные сенсоры, которые позволяют измерять низкие концентрации газообразного водорода [1, 2].

Конструкции чувствительных элементов газовых сенсоров

В литературе и на рынке газовых сенсоров (ГС) достаточно широко представлены отдельные сенсоры и измерительные системы, предназначенные для анализа газов и газовых смесей, в том числе и водородосодержащих [3–5]. Обобщенная классификация методов преобразования для ГС, представлена на рис. 1.

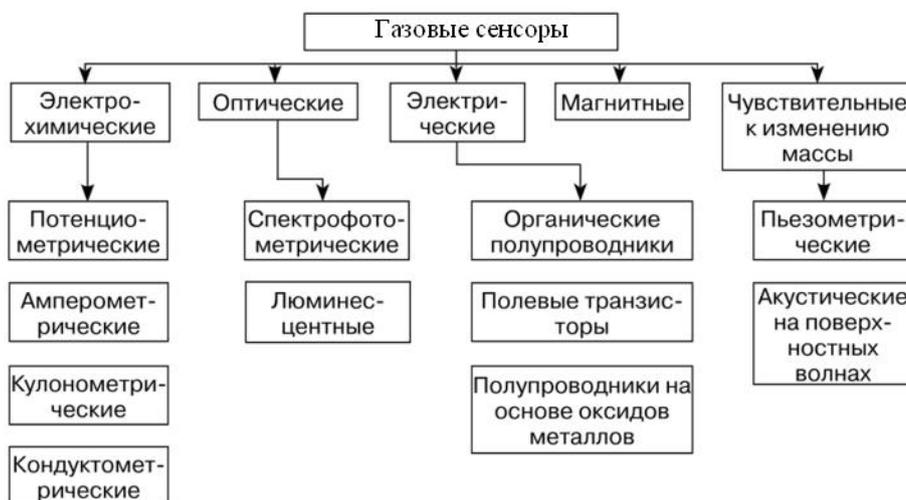


Рис. 1. Классификация газовых сенсоров по принципам преобразования

Основным элементом в ГС является газочувствительный элемент (ГЧЭ), преобразующий информативный электрофизический параметр анализируемого газа в иной, чаще всего в электрический параметр (ток, напряжение, частоту, емкость, проводимость). При этом преобразование концентрации контролируемого газа в многокомпонентной газовой смеси представляет собой довольно сложную и неоднозначную задачу, так как предполагает многоступенчатое преобразование разнородных физико-химических величин, например, концентрации носителей заряда, теплоемкости, сдвига уровня плоских зон, изменения туннельного тока, сдвига фазы когерентного излучения и проч. [6–9].

Следует отметить, что основными (базовыми), используемыми на практике ГЧЭ являются: термокондуктометрические, термохимические, а также микроэлектронные – пленочный и полупроводниковый. Проанализируем их более подробно с целью использования разработанных в них конструктивных решений [10, 11].

Термокондуктометрический ЧЭ (рис. 2, а, б) содержит измерительный элемент (ИЭ) в виде спирали из платиновой или никелевой проволоки, питаемой постоянным током, или два элемента R_1 и R_2 , последний – опорный – служит для компенсации погрешности от температуры. По своей сути измерительные элементы являются терморезисторами с линейным изменением своего сопротивления от температуры.

Термохимический ЧЭ (рис. 2, в) обеспечивает измерение содержания горючих газов, особенно СО в окружающем воздухе или в автомобильных выхлопных газах. Принцип действия ячейки состоит в том, что СО реагирует с кислородом воздуха на активном катализаторе, образуя СО₂. Выделяющееся при этом тепло, разогревая активную спираль, вызывает повышение ее сопротивления.

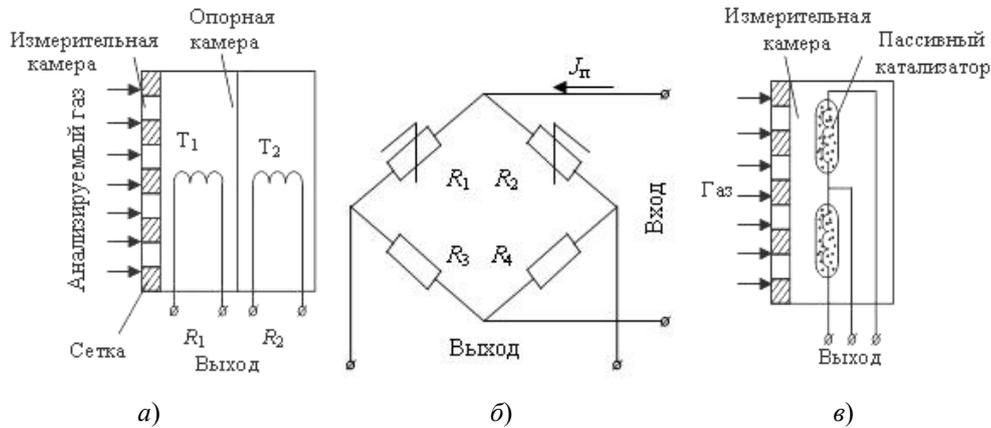


Рис. 2. Газовые чувствительные элементы:

а – структура; б – электрическая схема термокондуктометрического ЧЭ; в – термохимического ЧЭ

Резистор, покрытый пассивным катализатором, изменяет свое сопротивление только в зависимости от температуры окружающей среды, компенсируя влияние последней. С помощью ГС, оснащенных термохимическими ЧЭ, можно измерять весьма малые концентрации горючих газов (по СО до 10^{-4} %). Соответствующим подбором катализатора и температуры проволоки можно достигнуть определенной избирательности по анализируемым газам.

Полупроводниковые ЧЭ представлены на рис. 3. Все большее распространение получают твердотельные кремневые (полупроводниковые) газовые датчики. Они состоят из кремниевого кристалла, в теле которого методами термодиффузии, ионного легирования, вакуумного осаждения сформированы газочувствительная пленка из SnO₂, диффузионный резистор-нагреватель и термочувствительный диод. Сопротивление газочувствительной пленки уменьшается обратно пропорционально концентрации анализируемого газа. Для повышения точности температура ЧЭ стабилизируется на уровне 80 °С.

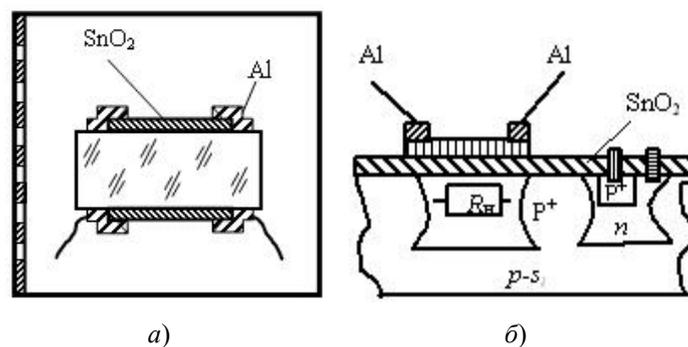


Рис. 3. Микроэлектронные ГЧЭ:

а – тонкопленочный; б – твердотельный

Для линеаризации и термокомпенсации характеристик ЭЧВ и сенсоров в целом используются как аппаратные способы (включение дополнительных резисторов и терморезисторов), так и программные (полиномиальная аппроксимация, введение поправок) методы моделирования [12, 13].

В качестве примера зависимости ЭФХ микроэлектронных ГЧЭ от концентрации газов на рис. 4 приведены концентрационная зависимость и циклограмма работы ГЧЭ.

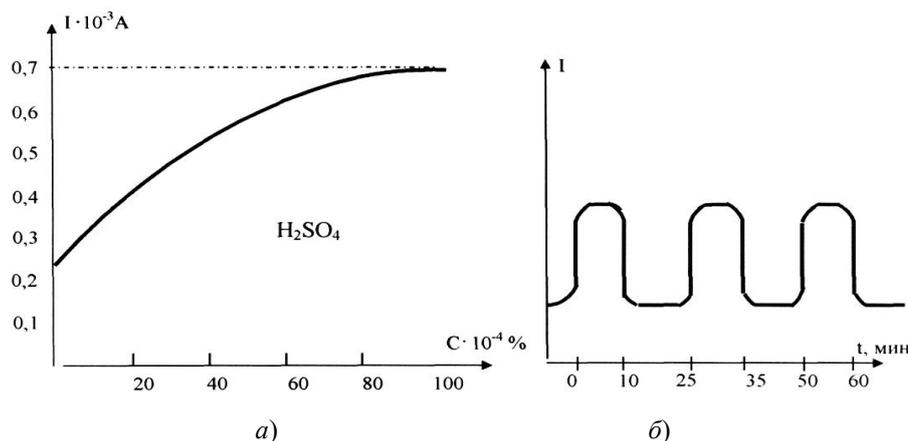


Рис. 4. Пример зависимости ЭФХ микроэлектронных ГЧЭ от концентрации газов:
 а – концентрационная зависимость ГЧЭ по отношению к парам серной кислоты;
 б – циклограмма работы ГЧЭ

Среди электрохимических сенсоров (ЭХС) получили распространение миниатюрные устройства, основанные на полевых транзисторах (рис. 5) [7, 14]. В них металлический контакт затвора транзистора заменен химически чувствительным слоем и электродом сравнения. В этом случае затвор представляет собой металлический слой, покрытый чувствительным материалом. Взаимодействие определяемого компонента с материалом затвора вызывает изменение электрического поля в области затвора и, следовательно, порогового потенциала и тока в транзисторе, что и обуславливает аналитический сигнал. Эти устройства чувствительны к некоторым газам, например H_2 , NH_3 , CH_4 , H_2S , с пределом обнаружения до 10^{-4} и 10^{-5} %. Чувствительность и селективность прибора обеспечиваются варьированием толщины активной зоны и типа катализаторов, а также подбором операционных температур, при которых функционируют элементы системы.

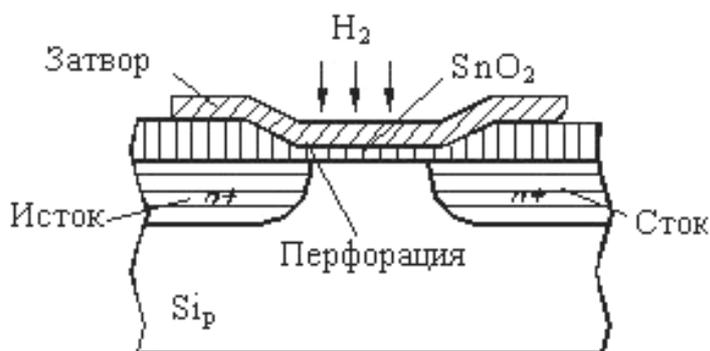


Рис. 5. Водородочувствительный элемент на основе полевого транзистора

Один из недостатков полевых транзисторов напрямую связан с принципом их функционирования, в соответствии с которым продукт каталитической реакции (например, водород) должен пройти через каталитически активный слой, чтобы воздействовать на зарядочувствительную структуру. Для этого в компоновке сенсора предусматривается наличие своеобразного «окна» проницаемости между каталитически активным слоем и затвором транзистора. Технологически эти требования удовлетворить достаточно сложно, в связи с чем использование ГС на основе ПТ на настоящий момент ограничивается в основном лабораторными исследованиями. Главными преимуществами ГС на ПТ являются: малые габариты (поверхность $1...2 \text{ мм}^2$) и масса; сравнительно высокое быстродействие ($1...10$ с); возможность одновременного определения нескольких компонентов анализируемой смеси. Полупроводниковые ГС применяют, в частности, для определения ионов K^+ , O_2 , оксидов азота, H_2S , CO , H_2 , углеводородов с пределами обнаружения $10^{-4}...10^{-5}$ объемных %. Недостатками таких ГС являются высокая (помеховая) чувствительность к парам воды, а также склонность к отравлению (необратимой по-

тере чувствительности) за счет поглощения летучих соединений серы и некоторых других органических соединений. Поскольку в их конструкции отсутствуют движущиеся детали и узлы, ГС являются потенциально надежными и долговечными.

Довольно успешно развивается отдельное направление ГС, основанное на применении в качестве ГЧЭ оптоволоконна с газопоглощающими покрытиями (рис. 6) [8, 9, 15].

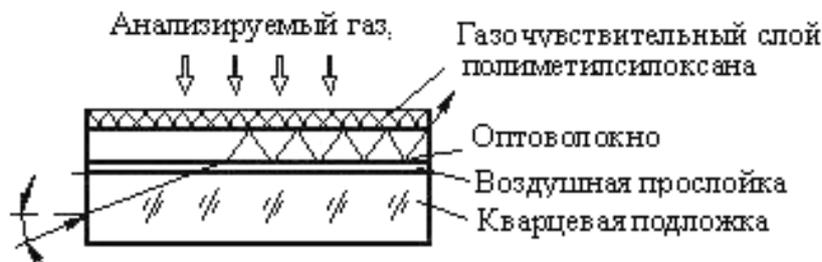


Рис. 6. Оптоволоконный ГЧЭ с активным газочувствительным слоем

Волоконно-оптические световоды на основе кварца, германатных, фторидных, халькогенидных стекол, кристаллов галогенидов таллия, серебра или цезия и полимерных материалов позволяют работать в инфракрасном (ИК), видимом и ультрафиолетовом (УФ)-диапазонах спектра. Созданы оптические сенсоры для определения pH растворов, ионов K^+ и Na^+ , CO_2 , O_2 , глюкозы и других веществ. В оптоволоконных сенсорах (ОВС) на торце световода может располагаться газопоглощающее или иное вещество, изменяющее свои оптические характеристики под действием контролируемого газа. К таким характеристикам относятся амплитуда, фаза, спектр оптического излучения.

Для повышения временной стабильности и снижения деградационных явлений в ГС на основе ПТ была разработана и апробирована улучшенная конструкция ЭЧВ (рис. 7). Особенностью такой конструкции является использование структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), выполненной в виде транзистора с подвешенным затвором [16].

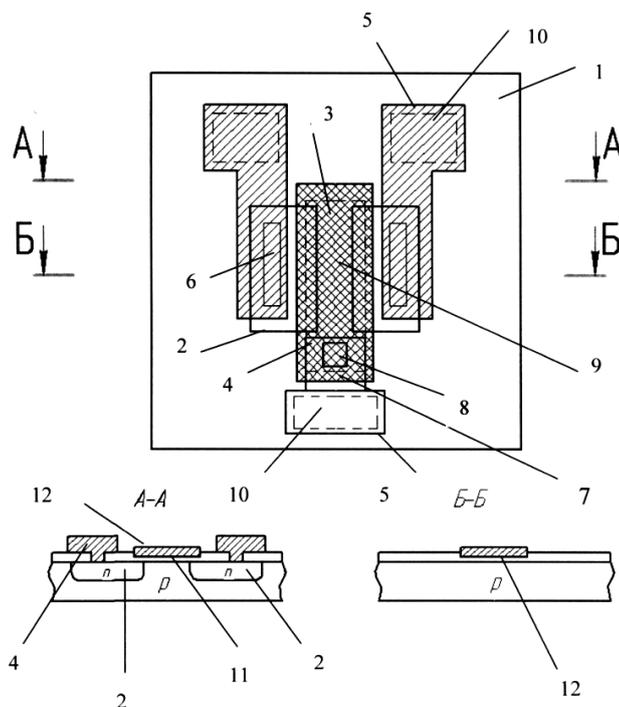


Рис. 7. ЭЧВ на основе МДП-транзистора с подвешенным затвором:

- 1 – Si – кристалл; 2 – области истока и стока; 3 – область с подзатворным диэлектриком;
- 4 – Al металлизация; 5 – контактные площадки; 6 – окна в окисле под контакт Al к Pd;
- 7 – участок Al металлизации, перекрытой Pd; 8, 9 – окна в защитной пленке SiO_2 ;
- 10 – Pd затвор; 11 – подзатворный окисел; 12 – затвор

Пленка палладия (Pd) интенсивно поглощает газообразный водород, образуя тем самым область с положительным встроенным зарядом, который управляет током исток-сток, формируя чувствительность к водороду. После цикла измерения остаточный водород из Pd затвора удаляется путем нагревания. Благодаря наличию воздушного промежутка между затвором и областями истока-стока МДП-транзистора остаточный заряд не проникает в активную зону, тем самым отсутствует эффект «отравления» и не уменьшается его чувствительность.

Указанный ЭЧВ в виде чипа устанавливается в измерительный модуль (ИМ) и его контактные площадки соединяются через проволочные выводы с соответствующими гермовыводами ИМ датчика водорода (рис. 8).

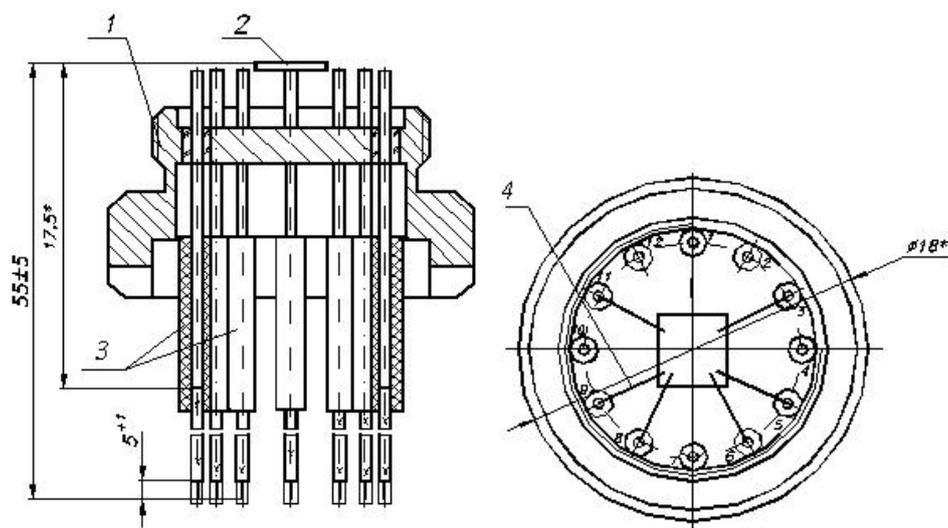


Рис. 8. Конструкция измерительного модуля датчика водорода со смонтированным в нем ЭЧВ:
1 – корпус ИМ; 2 – ЭЧВ; 3 – гермовыводы; 4 – проволочные выводы

Как показали исследования, электрофизические характеристики (ЭФХ) ЭЧВ на основе МДП-транзистора с подвешенным затвором имеют тенденцию к деградации, поэтому был разработан элемент, содержащий тонкопленочный газочувствительный резистор из сплава палладия с серебром (рис. 9) [17, 18]. Кроме того, в ЭЧВ для повышения чувствительности и уменьшения инерционности уменьшили толщину перемычки. Датчик на основе такого ЭЧВ был использован для контроля утечек водорода при заправке топливных баков ракеты-носителя «Энергия» с кислородно-водородным двигателем [19].

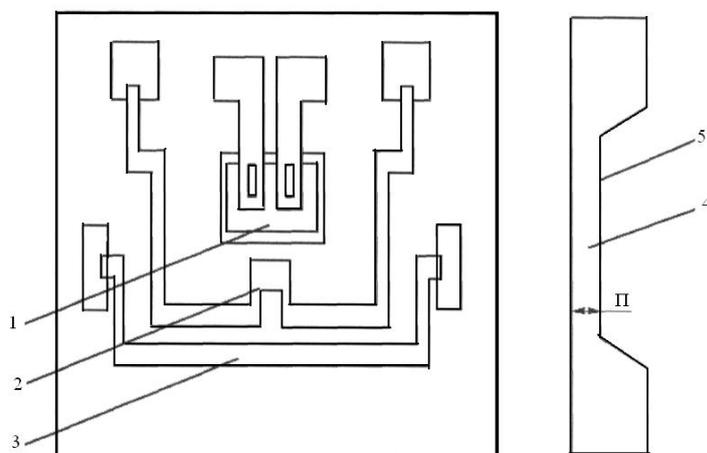


Рис. 9. Модернизированный ЭЧВ сенсора водорода:
1 – диодный термочувствительный элемент; 2 – тонкопленочный газочувствительный резистор из сплава палладия с серебром; 3 – диффузионный нагревательный элемент;
4 – тонкая перемычка; 5 – профиль

Характеристики изготовленных экспериментальных образцов ЭЧВ были исследованы на испытательном стенде (рис. 10) путем подачи контрольной газовой смеси, содержащей водород с 6 % объемной концентрацией и инертный газ – азот. По трубопроводам с клапанами в камеру подавались либо смесь водорода с азотом различной концентрации (0,3, 0,75, 1, 2 % соответственно), либо чистый азот или гелий для регенерации и обезгаживания ЧЭВ. Изменения напряжения на выходе схемы измерения при испытаниях регистрировались с помощью самописца.

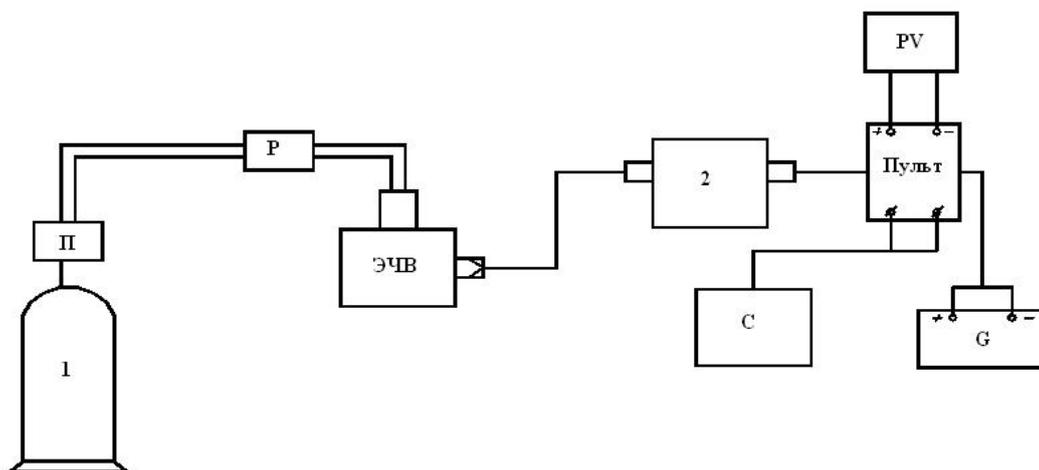


Рис. 10. Испытательный стенд для исследования водородных чувствительных элементов: ЭЧВ – элемент чувствительный к водороду; 1 – баллон с контрольной газовой смесью (6 % H_2 +94 % N_2); 2 – электронный преобразователь; П – редуктор газовый БКО-25; Р – ротаметр РМ-ГС-0,25; PV – вольтметр В7-46; G – источник питания постоянного тока Б5-49; С – регистратор типа КСП-2

Заключение

По результатам испытаний экспериментальных образцов были сделаны следующие выводы, связанные с влиянием газов и температуры на показания ЧЭВ:

1. При барометрическом давлении 750 мм рт.ст. и температуре окружающей среды 14 °С наблюдается эффект увеличения показаний ЧЭВ при подаче воздуха с влажностью 100 %. При этом величина эффекта меньше погрешности измерения емкости ЧЭВ. На водородосодержащей смеси наблюдается увеличение чувствительности к влаге. При чувствительности к водороду равной единице соотношение чувствительности к влаге и чувствительности к водороду достигает 1/12 и имеет максимум на концентрации H_2 0,2 % об.

2. Относительное (по отношению к исходному значению) изменение показаний ЧЭВ за 60 ч непрерывного измерения содержания H_2 в воздухе с концентрацией 0,27 % об., составляет не более 4,8 %. Относительное изменение показаний ВЧЭ за 60 ч непрерывного измерения содержания H_2 в азоте с концентрацией 0,46 % об. составляет не более 2,1 %.

Библиографический список

1. Джексон, Р. Р. Новейшие датчики / Р. Р. Джексон. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
2. Эггинс, Б. Химические и биологические сенсоры / Б. Эггинс. – Москва : Техносфера, 2005. – 336 с.
3. Korotcenkov, G. Review of electrochemical hydrogen sensors / G. Korotcenkov, S. D. Han, J. R. Stetter // Chem. Rev. – 2009. – Vol. 109 (3). – P. 1402–1433.
4. Игнатьева, Н. Датчики газа фирмы «Figaro» / Н. Игнатьева // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 2. – С. 34–37.
5. Никифорова, М. Ю. Интегральные сенсоры концентраций газов / М. Ю. Никифорова, Б. И. Подлепский // Датчики и системы. – 2002. – № 4. – С. 38–53.
6. Методы и средства измерения неэлектрических величин : учеб. пособие : в 2 ч. / П. Г Михайлов, А. А. Кичкидов, Г. В. Петрунин, В. Ф. Ульянов, И. О. Лапшин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – Ч. 1. Физические принципы и методы измерения неэлектрических величин. – 112 с.

7. Коваленко, А. В. Характеристики и схемы включения МДП-транзисторных чувствительных элементов / А. В. Коваленко, М. Ю. Никифорова, Б. И. Подлепецкий // Датчики и системы. – 2008. – № 8. – С. 10–14.
8. Pd/Ag coated fiber Bragg grating sensor for hydrogen monitoring in power transformers / G. M. Ma, J. Jiang, C. R. Li, H. T. Song, Y. T. Luo, H. B. Wang // Review of Scientific Instruments. – 2015. – Vol. 86. – P. 045003.
9. Егоров, А. А. Применение интегрально-оптических датчиков для контроля опасных газообразных веществ / А. А. Егоров, М. А. Егоров, Т. К. Чехлова, А. Г. Тимакин // Датчики и системы. – 2008. – № 1. – С. 25–30.
10. Fisser, M. Optimizing the sensitivity of palladium based hydrogen sensors / M. Fisser, R. A. Badcock, P. D. Teal // Sensors and Actuators B Chemical. – 2018. – Vol. 259. – P. 10–19.
11. Михайлов, П. Г. Чувствительные элементы газовых сенсоров / П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина // Датчики и системы. – 2005. – № 8. – С. 12–14.
12. Hübert, T. Hydrogen sensors – A review / T. Hübert, L. Boon-Brett, G. Black, U. Banach // Sensors and Actuators B Chemical. – 2011. – Vol. 157 (2). – P. 329–352.
13. Патрушева, Т. Н. Сенсорика. Современные технологии микро- и нанoeлектроники : учеб. пособие / Т. Н. Патрушева. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 264 с.
14. Элементы газочувствительных датчиков на основе микротехнологий / Ю. А. Воронов, М. Ю. Никифорова, А. В. Коваленко, Б. И. Подлепецкий, Н. Н. Саматаев, А. А. Васильев // Датчики и системы. – 2010. – № 1. – С. 28–36.
15. Egorov, A. A. Low-loss inexpensive integrated-optical waveguides as a sensitive gas sensor / A. A. Egorov, M. A. Egorov, T. K. Chekhlova, A. G. Timakin // ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics (September 15–18, 2008. St. Petersburg. Russia). – St. Petersburg : ИТМО, 2008. – P. 208–211.
16. Патент SU 1785049 H01L 21/336 Способ изготовления датчиков водорода на МОП транзисторах / Козин С. А., Маринина Л. А. ; опубл. 30.12.1990.
17. Михайлов, П. Г. Чувствительные элементы газовых сенсоров / П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина // Датчики и системы. – 2005. – № 10. – С. 2–5.
18. Михайлов, П. Г. Микроэлектронные газочувствительные элементы / П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина // Вооружение, безопасность, конверсия : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. – С. 56–63.
19. Каторгин, Б. И. Разработка и внедрение на мировой рынок мощного маршевого жидкостного ракетного двигателя РД180 / Б. И. Каторгин, В. И. Семенов, В. К. Чванов, Ф. Ю. Челькис // Наука и технологии в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 33–39.

References

1. Dzhekson P. P. *Noveyshie datchiki* [The latest sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 384 p. [In Russian]
2. Eggins B. *Khimicheskie i biologicheskie sensory* [Chemical and biological sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 336 p. [In Russian]
3. Korotcenkov G., Han S. D., Stetter J. R. *Chem. Rev.* 2009, vol. 109 (3), pp. 1402–1433.
4. Ignat'eva N. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business]. 2005, no. 2, pp. 34–37. [In Russian]
5. Nikiforova M. Yu., Podlepetskiy B. I. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2002, no. 4, pp. 38–53. [In Russian]
6. Mikhaylov P. G., Kichkidov A. A., Petrunin G. V., Ul'yanov V. F., Lapshin I. O. *Metody i sredstva izmereniya neelektricheskikh velichin: ucheb. posobie: v 2 ch.* [Methods and means of measuring non-electrical quantities: textbook. manual : in 2 parts]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003, part 1, 112 p. [In Russian]
7. Kovalenk A. B., Nikiforova M. Yu., Podlepetskiy B. I. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2008, no. 8, pp. 10–14. [In Russian]
8. Ma G. M., Jiang J., Li C. R., Song H. T., Luo Y. T., Wang H. B. *Review of Scientific Instruments*. 2015, vol. 86, p. 045003.
9. Egorov A. A., Egorov M. A., Chekhlova T. K., Timakin A. G. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2008, no. 1, pp. 25–30. [In Russian]
10. Fisser M., Badcock R. A., Teal P. D. *Sensors and Actuators B Chemical*. 2018, vol. 259, pp. 10–19.
11. Mikhaylov P. G., Marinina L. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2005, no. 8, pp. 12–14. [In Russian]
12. Hübert T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. *Sensors and Actuators B Chemical*. 2011, vol. 157 (2), pp. 329–352.

13. Patrusheva T. N. *Sensorika. Sovremennye tekhnologii mikro- i nanoelektroniki: ucheb. posobie* [Sensors. Modern technologies of micro-and nanoelectronics: textbook]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2013, 264 p. [In Russian]
14. Voronov Yu. A., Nikiforova M. Yu., Kovalenko A. V., Podlepetskiy B. I., Samataev N. N., Vasil'ev A. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2010, no. 1, pp. 28–36. [In Russian]
15. Egorov A. A., Egorov M. A., Chekhlova T. K., Timakin A. G. *ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics (September 15–18, 2008. St. Petersburg. Russia)*. St. Petersburg: ITMO, 2008, pp. 208–211.
16. Patent SU 1785049 H01L 21/336 *Sposob izgotovleniya datchikov vodoroda na MOP tranzistorakh* [Patent SU 1785049 H01L 21/336 Method for manufacturing hydrogen sensors on MOSFETs]. Kozin S. A., Marinina L. A.; publ. 30.12.1990. [In Russian]
17. Mikhaylov P. G., Marinina L. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2005, no. 10, pp. 2–5. [In Russian]
18. Mikhaylov P. G., Marinina L. A. *Vooruzhenie, bezopasnost', konversiya: tr. Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Armament, security, conversion: proceedings of the international conference. scientific-technical conf.]. Penza: Izd-vo PGU, 2004, pp. 56–63. [In Russian]
19. Katorgin B. I., Semenov V. I., Chvanov V. K., Chel'kis F. Yu. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and technology in industry]. 2011, no. 1, pp. 33–39. [In Russian]

Михайлов Петр Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, ул Байдукова/Гагарина 1а/11)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Mikhaylov Petr Grigor'evich

doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

Маринина Лариса Александровна

кандидат технических наук, преподаватель,
Пензенский филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Пенза, Военный городок, 1)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Marinina Larisa Aleksandrovna

candidate of technical sciences, lecturer,
Penza branch of Military Academy
Logistics Support named after general
of the army A. V. Khruleva
(1 Voenny gorodok, Penza, Russia)

Глебова Татьяна Александровна

доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: tan/1952@mail.ru

Glebova Tat'yana Aleksandrovna

associate professor,
sub-department of information and computer systems,
Penza State University
of Architecture and Construction
(28 Herman Titov street, Penza, Russia)

Базарбай Лашын

докторантка,
Казахский национальный технический
университет им. К. Сатпаева
(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22)
E-mail: lashyn_7754@mail.ru

Bazarbay Lashyn

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

Соколов Александр Владимирович

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

Sokolov Aleksandr Vladimirovich

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

Аналиева Ажар Уразбаевна

преподаватель,

Казахстанский университет инновационных

и телекоммуникационных систем

(Казахстан, г. Уральск, ул. М. Маметовой, 81)

E-mail: azhara_1980@mail.ru

Analieva Azhar Urazbaevna

lecturer,

Kazakhstan University of Innovative

and Telecommunication Systems

(81 M. Mametovoy street, Uralsk, Kazakhstan)

Образец цитирования:

Чувствительные элементы водорода. Методы преобразования и базовые конструкции / П. Г. Михайлов, Л. А. Маринина, Т. А. Глебова, Л. Базарбай, А. В. Соколов, А. У. Аналиева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 38–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-5.

А. Р. Григорьян, Н. М. Богатов

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ В ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

L. R. Grigor'yan, N. M. Bogatov

APPLICATION OF PHASE METHODS IN IDENTIFICATION OF PLACES OF DAMAGE TO INSULATION COATING OF PIPELINES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Содержание данной работы определяется актуальностью диагностики изоляционного покрытия трубопроводов. Предметом исследования являются фазовые методы идентификации мест повреждения изоляции трубопроводов с использованием контактных и бесконтактных способов съема поверхностных потенциалов грунта. **Материалы и методы.** Отличительной особенностью предложенных фазовых методов является применение ключевых синхронных детекторов, выходной сигнал которых определяется амплитудными и фазовыми параметрами контролируемых сигналов. Для решения проблемы измерения фазовых параметров сигналов с пространственно разнесенных по длине трубопровода генератора и приемника предложено использовать квадратурные синхронные детекторы, синхронизированные сигналами Глонасс/GPS. **Результаты.** Предложенная методика позволила решить проблему временной синхронизации, используя «технологический прием» измерения фазы выходного сигнала генератора в начальной точке обследуемого трубопровода, а оценку фазовых параметров осуществить, используя широкополосную и помехоустойчивую оптимальную корреляционную обработку испытательных сигналов. **Выводы.** Предложенное аппаратно-технологическое решение позволило решить проблему фазовой идентификации мест повреждения изоляционного покрытия с разнесенных в пространстве объектов.

A b s t r a c t. Background. The content of this work is explained by the relevance of the diagnostics of the insulation coating of pipelines. The subject of the study is the phase methods for identifying places of damage to the insulation of pipelines using contact and non-contact methods for removing surface potentials of the soil. **Materials and methods.** A distinctive feature of the proposed phase methods is the use of key synchronous detectors, the output signal of which is determined by the amplitude and phase parameters of the monitored signals. To solve the problem of measuring the phase parameters of signals spatially spaced along the generator and receiver pipelines, it is proposed to use synchronous quadrature detectors synchronized with Glonass / GPS signals. **Results.** The proposed methodology made it possible to solve the problem of time synchronization using a “technological technique” for measuring the phase of the generator output signal at the starting point of the pipeline under investigation, and to evaluate the phase parameters using broadband and noise-resistant optimal correlation processing of test signals. **Conclusions.** The proposed hardware and technological solution allowed us to solve the problem of phase identification of places of damage to the insulation coating from objects spaced apart in space.

К л ю ч е в ы е с л о в а: трубопроводы, схемотехника, измерители, фаза, место повреждения, переходные процессы, время распространения.

К e y w o r d s: pipelines, circuitry, meters, phase, place of damage, transients, propagation time.

Введение

В соответствии с нормативными документами [1] в практике электрохимической защиты трубопроводов применяются две основные процедуры:

- измерение параметров, характеризующих эффективность электрохимической защиты;
- электрометрическая диагностика и идентификация мест повреждения трубопроводов.

В качестве основных параметров, характеризующих коррозионную защищенность трубопроводов, признаны: поляризационный потенциал, сопротивление изоляционного покрытия и растекание тока, а также удельное сопротивление и инометрические показатели грунта [2].

Измерение вышеприведенных параметров позволяет получить интегральную оценку коррозионной защищенности подземных коммуникаций. Не менее важно также идентифицировать конкретное место повреждения их изоляции, что особенно актуально с учетом фактора масштабности объектов исследования и экономико-экологических факторов при возникновении кризисных состояний.

В практике электрометрической диагностики инженерных коммуникаций используются как контактные методы измерения поверхностных потенциалов грунта, так и бесконтактные индукционные методы измерения амплитудных параметров тестового сигнала. Недостатком обоих методов является использование амплитудных параметров, которые менее помехоустойчивые, что не обеспечивает необходимой достоверности в фиксации дефектов в изоляционном покрытии подземных коммуникаций.

Радикально решить эту проблему возможно при переходе к фазовой идентификации мест повреждения при представлении трубопровода как искусственной линии связи [3].

В данной работе рассмотрены способы аппаратной реализации диагностики подземных коммуникаций, область и эффективность их применения.

Аппаратура диагностического обследования

В общем случае измерительный комплекс включает трассопоисковый генератор, осуществляющий необходимое тестовое воздействие на исследуемый объект и трассопоисковый приемник, анализирующий информативные параметры тестового сигнала при его прохождении по исследуемому объекту. Наиболее значимыми параметрами генератора являются: частота генерируемых гармонических сигналов в диапазоне от инфранизких (единицы герц) до низких (до 10 кГц) частот, а также выходная мощность (до 500 Вт) и величина тестового тока (до 25 А), т.е. параметры, характеризующие основное его предназначение. Частотные параметры позволяют реализовать наиболее эффективные способы диагностики подземных коммуникаций, а мощностные – проводить анализ по всей длине контролируемого участка между двумя станциями катодной защиты.

Наряду с применением генераторов с питанием от сети 220 В применяются также генераторы с аккумуляторным питанием, подключаемые к трубопроводу через контрольно-измерительные пункты. Мощность таких генераторов составляет от 3 до 10 Вт, а длина контролируемого участка не превышает 1÷2 км. Схемотехника генераторов довольно разнообразна и подробно рассмотрена в работах [4–6].

В отношении параметров трассопоисковых приемников необходимо отметить, что они должны обеспечивать предельную чувствительность и избирательность в процессе усиления тестового сигнала, а также необходимую линейность при его детектировании во всем динамическом диапазоне.

Схемотехника приемников во многом определяется используемым способом диагностики изоляционного покрытия трубопроводов. Вот почему детальный анализ структуры приемников рассмотрим в контексте применяемых методов поиска повреждения изоляционного покрытия трубопроводов.

Методы диагностики повреждения трубопроводов

Съем информации с исследуемого подземного трубопровода производится с поверхности земли и осуществляется контактными методами, анализирующими электрические параметры, и бесконтактными методами, анализирующими магнитные параметры электромагнитного поля, наведенного протекающим по трубопроводу тестовым током.

Наиболее распространенными контактными методами являются метод «интенсивных измерений» и метод Пирсона.

Суть метода «интенсивных измерений» заключается в измерении вдоль трассы трубопровода через каждые 3–5 м поверхностных потенциалов труба-земля и горизонтальных градиентов напряжения как при включенной, так и при отключенной внешней поляризации.

Последовательно измеряя указанные потенциалы согласно рис. 1, определяют истинное значение защитного потенциала труба-земля по формуле [7]

$$U_3 = U_{\text{отк}} - \frac{U_{\Gamma \text{отк}}}{U_{\Gamma \text{вкл}} - U_{\Gamma \text{отк}}} (U_{\text{вкл}} - U_{\text{отк}}), \quad (1)$$

где U_3 – истинное значение потенциала труба-земля; $U_{\text{вкл}}$, $U_{\text{отк}}$ – измеренные на поверхности потенциалы соответственно при включенной и отключенной установке катодной защиты; $U_{\Gamma \text{вкл}}$, $U_{\Gamma \text{отк}}$ – горизонтальные градиенты напряжения при включенной и отключенной поляризации.

Измеренные значения фиксируются в переносном компьютере с последующей математической обработкой в стационарных условиях с представлением результатов в виде графиков или таблиц. Трудоемкость и себестоимость данного метода очевидна и определяется как числом операторов (не менее трех), так и необходимостью дополнительного оборудования для периодического прерывания тока поляризации станции катодной защиты. Вот почему его применение целесообразно лишь на особо опасных в коррозионном отношении участках трассы.

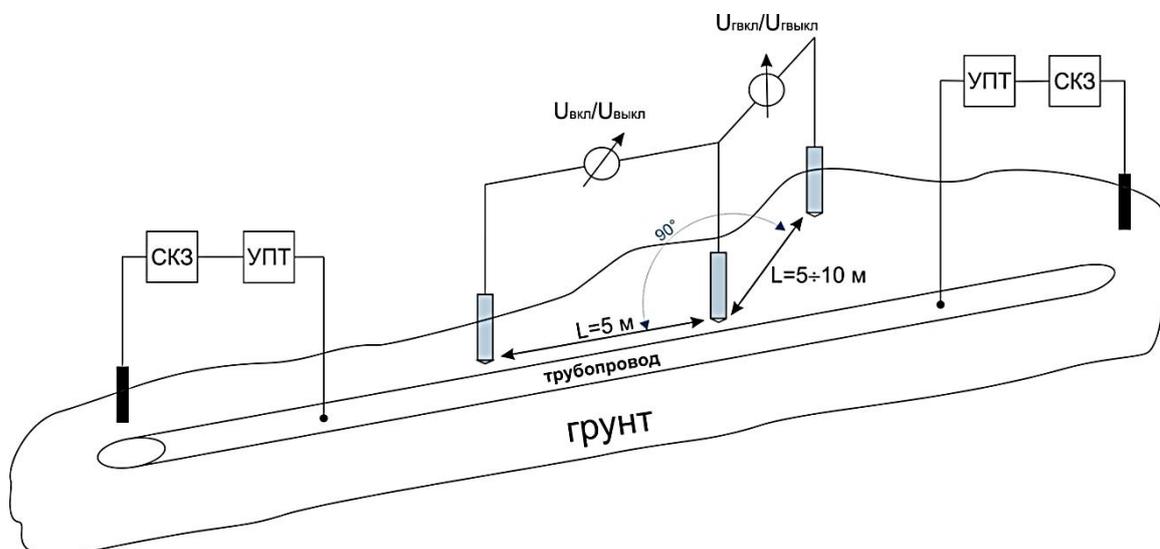


Рис. 1. Схема «интенсивных измерений»

Метод Пирсона наиболее известен и распространен среди способов диагностики дефектов изоляционного покрытия трубопроводов [8]. Он основан на измерении градиентов потенциалов (разности уровней сигналов) на поверхности земли между двумя перемещаемыми вдоль трубопровода стальными контактными электродами. Для этого два оператора движутся вдоль трубопровода один за другим, причем каждый из них поддерживает, по крайней мере, один из своих металлических контактных электродов в постоянном контакте с землей. Кабели, подсоединенные к контактным электродам, определяют расстояние между операторами (примерно 8–10 м). При прохождении первого оператора над дефектом наблюдается повышение уровня сигнала. Как только первый оператор удаляется от дефекта, уровень сигнала

уменьшается и затем снова увеличивается, как только второй оператор проходит над дефектом. Интервал между пиками уровня сигнала соответствует расстоянию между двумя операторами, и в его же пределах располагается дефект изоляционного покрытия трубопровода [9].

Эффективность метода Пирсона определяется точностью измерения градиентов потенциалов на поверхности земли и обусловлена чувствительностью используемого трассопоискового дифференциального приемника [10]. Порог чувствительности дифференциальных приемников с использованием амплитудного детектирования сигналов не может быть меньше 10–20 мВ [11].

Повысить точность измерения градиентов потенциалов дифференциальным приемником на поверхности земли возможно при применении ключевого синхронного детектирования сигналов, что позволяет детектировать малые сигналы в микровольтовом диапазоне и одновременно повысить избирательность измерения градиентов потенциалов.

Для этого измерение градиентов потенциалов вдоль трубопровода осуществляют при одновременном бесконтактном индукционном измерении уровней сигналов, и после ограничения их по амплитуде используют в качестве опорных для ключевого синхронного детектирования сигналов с контактных электродов. При этом введение бесконтактного индукционного измерения сигналов позволяет одновременно проводить фазовую идентификацию дефектов изоляционного покрытия трубопроводов [12].

На рис. 2 представлена функциональная схема устройства диагностики дефектов изоляционного покрытия трубопроводов.

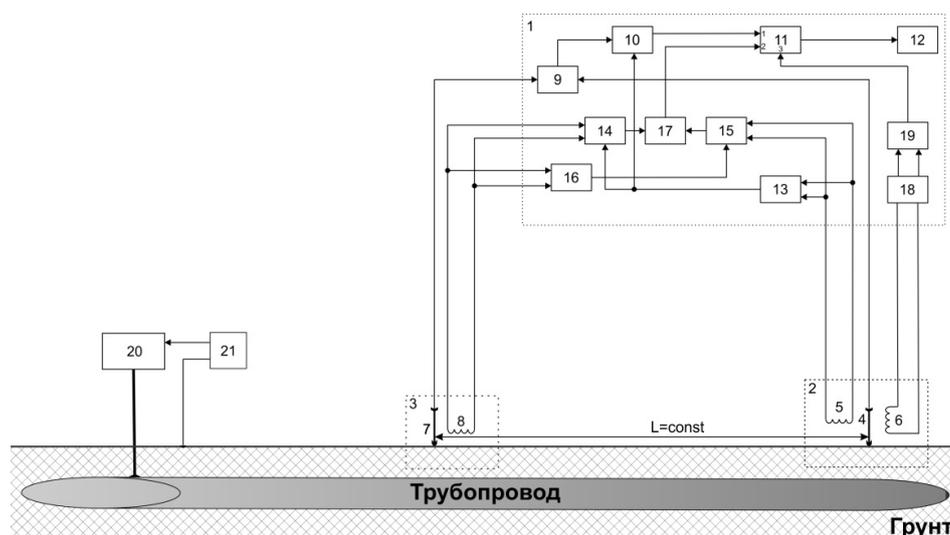


Рис. 2. Функциональная схема устройства диагностики дефектов изоляционного покрытия трубопроводов

Диагностику дефектов изоляционного покрытия трубопроводов осуществляют следующим образом. Предварительно к исследуемому трубопроводу на контрольно-измерительном пункте 20 подключают трассопоисковый генератор 21 с установленными значениями по частоте и мощности сигнала. Далее оба оператора подсоединяют к датчикам 2 и 3 соответствующие кабели, длина которых определяет расстояние между операторами и в процессе движения вдоль трассы остается постоянной $L = \text{const}$. Первый оператор задает темп и несет трассопоисковый приемник 1. Для поиска трассы (трубопровода) и определения осевой линии трубопровода используют антенну 6, сигнал с которой через избирательный усилитель 18 и детектор 19 поступает на третий аналоговый вход микроконтроллера 11, который выводит на графическом дисплее 12 информацию оператору о его положении относительно осевой линии трубопровода, что позволяет производить все измерения непосредственно над осевой линией трубопровода.

В процессе движения над осевой линией трубопровода дефект в изоляции трубопровода обнаруживают по увеличению уровней сигналов на первом и втором аналоговых входах микроконтроллера 11 с блоков амплитудной и фазовой идентификации трассопоискового приемника 1.

Амплитудную идентификацию дефекта в изоляции трубопровода осуществляют путем сравнения дифференциальных приемников 9 уровней выходных сигналов с контактными электродами 4 и 7 датчиков 2 и 3 соответственно первого и второго операторов с последующим ключевым детектированием его выходного напряжения синхронным детектором 10, опорным сигналом для которого после ограничения по уровню усилителем-ограничителем 13 является сигнал с горизонтальной индукционной антенны 5 датчика 2 первого оператора трассопоискового приемника 1. При амплитудной идентификации разностный выходной сигнал синхронного детектора 10 определяют из формулы (1) и при наличии дефекта наблюдают увеличение его уровня:

$$\Delta U_{\text{сд1}} = K_{\text{дв1}} K_{\text{сд1}} (U_{\text{a1}} - U_{\text{a2}}), \quad (2)$$

где $U_{\text{a1}}, U_{\text{a2}}$ – амплитудные значения сигналов $u_{\text{к1}}(t) = U_{\text{a1}} \cos \omega t$, $u_{\text{к2}}(t) = U_{\text{a2}} \cos \omega t$ с контактных электродов 4 и 7; $K_{\text{дв1}}, K_{\text{сд1}}$ – коэффициенты усиления первого дифференциального усилителя 9 и первого синхронного детектора 10 соответственно; ω – частота сигнала генератора 21.

Фазовую идентификацию дефекта в изоляции трубопровода осуществляют путем сравнения дифференциальным усилителем 17 выходных сигналов с синхронных детекторов 15 и 14, опорными сигналами для которых являются сигналы с горизонтальных индукционных антенн 5 и 8, ограниченных по уровню усилителями-ограничителями 13 и 16 соответственно. При этом входными сигналами синхронных детекторов 15 и 14 являются выходные сигналы горизонтальных антенн 5 и 8 с датчиков 2 и 3 первого и второго операторов соответственно.

При наличии дефекта в изоляции трубопровода сигналы с горизонтальных индукционных антенн 5 и 8 в момент времени t_i определяют соответственно из выражений

$$U_1(t_i) = (U_i + \Delta U_i) \cos(\varphi_i + \Delta \varphi_i), \quad (3)$$

$$U_2(t_i) = U_i \cos \varphi_i, \quad (4)$$

где $\Delta \varphi_i$ и ΔU_i – скачок фазы и амплитуды в горизонтальной индукционной антенне 5, вызванный дефектом изоляционного покрытия трубопровода в i точке измерения; U_i и φ_i – фаза и амплитуда сигнала в горизонтальной индукционной антенне датчиков; $\varphi_i = \omega t_i$.

Выходные напряжения в момент времени t_i второго 14 и третьего 15 синхронных детекторов определяют из выражений

$$U_{\text{сд2}} = K_{\text{сд2}} (U_i + \Delta U_i) \cos \Delta \varphi_i, \quad (5)$$

$$U_{\text{сд3}} = K_{\text{сд3}} U_i \cos \Delta \varphi_i, \quad (6)$$

где $K_{\text{сд2}}, K_{\text{сд3}}$ – коэффициенты передачи второго 14 и третьего 15 синхронных детекторов соответственно.

Следовательно, выходной разностный сигнал дифференциального усилителя 17 при $K_{\text{сд2}} \cong K_{\text{сд3}} \cong K_{\text{сд}}$ будет равен

$$\Delta U_{\text{дв2}} = K_{\text{сд}} K_{\text{дв2}} \Delta U_i \cos \Delta \varphi_i, \quad (7)$$

где $K_{\text{дв2}}$ – коэффициент передачи дифференциального усилителя 17.

Микроконтроллер 11 преобразует аналоговые сигналы с первого синхронного детектора 10 и второго дифференциального усилителя 17 в цифровой сигнал с последующим выводом на графический дисплей 12. При этом на графическом дисплее 12 отражается информация, характеризующая как амплитудную (сигналы с контактных электродов 4 и 7), так и фазовую (сигналы с бесконтактных индукционных горизонтальных антенн 5 и 8) идентификацию состояния изоляционного покрытия.

Из анализа модифицированного метода Пирсона следует:

– дополнение контактного способа измерения сигналов бесконтактным позволило при измерениях градиентов потенциалов осуществить синхронное детектирование сравниваемых сигналов, используя в качестве опорного сигнал с горизонтальной индукционной антенны первого оператора трассопоискового приемника;

– предложенное техническое решение идентификации дефектов позволяет одновременно с амплитудной проводить дополнительно высокочувствительную фазовую идентификацию, что, в целом, значительно повышает точность идентификации мест повреждения в изоляционном покрытии трубопроводов;

– с учетом того, что чувствительность синхронных детекторов находится в микровольтовом диапазоне, предлагаемый метод измерения потенциалов позволяет идентифицировать самые незначительные дефекты в изоляционном покрытии трубопроводов.

Рассмотрим далее бесконтактные индукционные методы. Наиболее производительным является метод интегральной оценки состояния изоляционного покрытия трубопроводов [13]. Согласно этому методу, к трубопроводу подключают генератор сигналов в контрольно-измерительном пункте. После определения осевой линии трубопровода измеряют величину напряжения сигналов в i -й точке, значение которого корректируют с учетом глубины трубопровода в данной точке. Далее измерение величины напряжения сигнала повторяют в $i+1$ точке трубопровода, отдаленной от i точки на расстояние L , составляющее несколько сот метров. Разница двух значений напряжений относится к расстоянию L , определяют величину затухания сигнала между двумя точками измерения. По относительному значению затухания с учетом частоты генератора из приведенных в работе [13] таблиц определяют состояние изоляционного покрытия трубопровода. Достоинством метода является сравнительная простота его реализации, а недостатком – невозможность идентифицировать конкретное место повреждения изоляционного покрытия трубопровода. Для решения этой проблемы в настоящее время применяется амплитудный анализ протекающего по трубопроводу испытательного сигнала, по характеру поведения которого диагностируют дефекты в изоляционном покрытии трубопроводов. Однако использование амплитудного анализа испытательных сигналов при всей простоте его реализации не обеспечивает необходимой достоверности в фиксации дефектов изоляционного покрытия трубопроводов.

Решение этой проблемы возможно на основе анализа фазовых параметров испытательных сигналов с представлением трубопровода как искусственной линии связи. Однако практическая реализация фазового метода затруднена из-за пространственного разнесения по длине трубопровода генератора и приемника, разность фаз между выходными сигналами генератора (опорным сигналом) и входным сигналом приемника (измерительный сигнал) является исследуемым фазовым параметром.

Для решения этой проблемы предложено два способа [14, 15]. Оба основаны на применении спутниковой системы Глонасс/GPS для временной синхронизации разнесенных в пространстве объектов (генератора и приемника). Различия заключаются в структуре фазовых приемников:

– первый способ измерения фазы выходных сигналов генератора и приемника осуществляется векторными вольтметрами по трем выборкам за период исследуемых сигналов с передачей измеренных значений по радиоканалу;

– второй – с использованием квадратурных синхронных детекторов, синхронизированных сигналами Глонасс/GPS, что позволило заменить передачу сравниваемых параметров по радиоканалу на «технологический прием» измерение фазы φ_r выходного сигнала генератора трассопоисковым приемником в начальной точке обследуемого трубопровода, а оценку параметров сигналов по дискретным выборкам заменить на широкополосную и помехоустойчивую оптимальную корреляционную обработку сигналов [16].

Структурная схема предлагаемого измерительного комплекса представлены на рис. 3. Измерительный комплекс состоит из трассопоискового генератора 1 и приемника 2.

Трассопоисковый генератор 1 осуществляет запитку исследуемого трубопровода. Тактовые импульсы с Глонасс/GPS приемника 3 с частотой равной 1 Гц поступают в микроконтроллер 4, осуществляющий временную синхронизацию генератора 5. Это означает, что выходной сигнал с усилителя мощности 6 трассопоискового генератора 1, фаза которого

в этом случае жестко привязана к тактовым импульсам Глонасс/GPS приемника 3, может быть использован в измерительном комплексе в качестве опорного, так как его фаза не меняется.

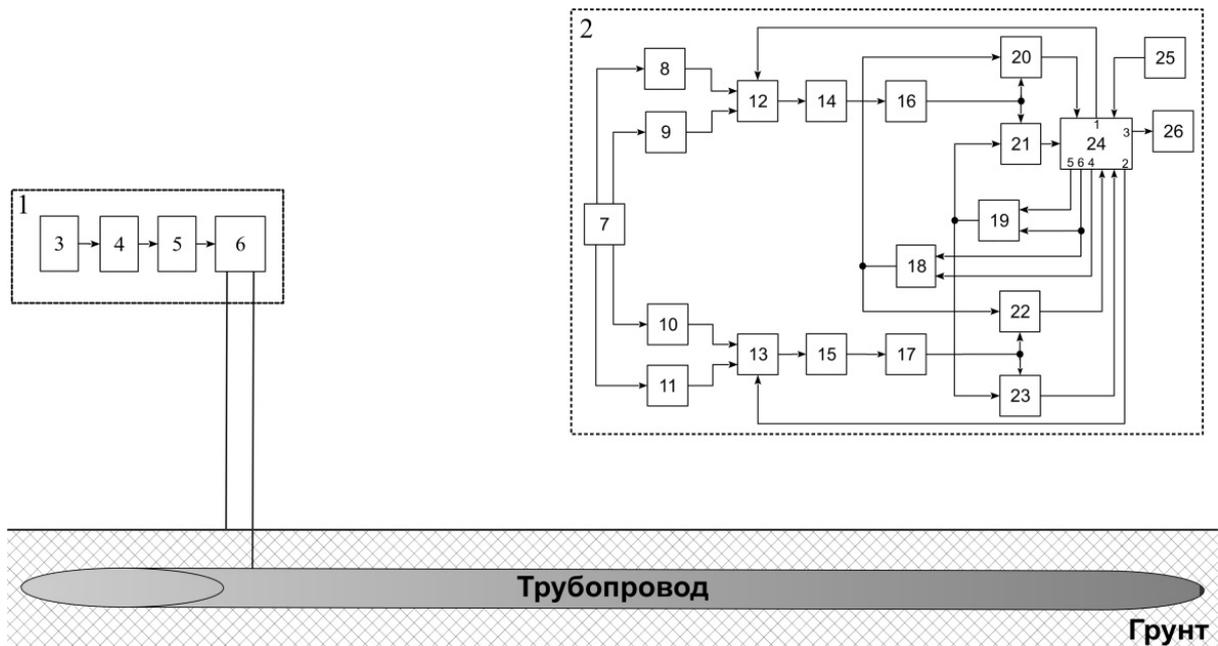


Рис. 3. Структурная схема комплекса

Это осуществляется путем измерения фазы φ_r выходного сигнала трассопоискового генератора 1 трассопоисковым приемником 2 в начальной точке обследуемого трубопровода и фиксируется (запоминается) в микроконтроллере 24 трассопоисковым приемником 2.

Для этого трассопоисковым приемником 2 измеряют фазу φ_r выходного сигнала в начальной точке обследуемого трубопровода и фиксируют в микроконтроллере 24 трассопоискового приемника 2.

Цикл генерации трассопоискового генератора 1 $T_{\text{ц}} = 1$ с начинается по поступлению в микроконтроллер 4 синхронизирующих тактовых импульсов с Глонасс/GPS приемника 3. Поэтому собственная нестабильность частоты задающего генератора 5, а также некрatность периода сигнала к циклу измерения не оказывают влияния на стабильность фазы выходного опорного сигнала трассопоискового генератора 1, а следовательно, и на точность процесса фазовой идентификации измерительным комплексом.

В трассопоисковом приемнике 2 при поиске места повреждения трубопровода выходные сигналы индукционных преобразователей антенного блока 7 поступают на преобразователи напряжение-ток 8, 9, 10, 11, обеспечивающие усиление сигнала, коммутаторы сигналов 12 и 13, коммутирующие их, и подают на фильтры 14 и 15, а затем происходит их масштабирование масштабирующими преобразователями 16 и 17. К выходу первого масштабирующего преобразователя 16 подключены объединенные входы первого и второго синхронных детекторов 20 и 21, на которые подаются опорные сигналы, сдвинутые по фазе на 90° с первого 18 и второго 19 DDS генераторов, параметры которых (частота, фаза) управляются и синхронизируются от микроконтроллера 24 трассопоискового приемника 2. Выходные сигналы с первого 20 и второго 21 синхронных детекторов поступают на измерительные входы микроконтроллера 24, где вычисляют амплитуду и фазу выходного сигнала первого масштабного преобразователя 16 по формулам:

$$U_{\text{МП}} = \sqrt{U_{\text{сд1}}^2 + U_{\text{сд2}}^2} = \sqrt{[U_{\text{МП}} \cos \varphi]^2 + [U_{\text{МП}} \sin \varphi]^2}, \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{МП}} = 0,5 \left[\arccos \frac{U_{\text{сд1}}}{U_{\text{МП}}} + \arcsin \frac{U_{\text{сд2}}}{U_{\text{МП}}} \right], \quad (9)$$

где $\varphi_{\text{МП}}$ – фаза первого масштабирующего преобразователя 16; $U_{\text{МП}}$ – напряжение первого масштабирующего преобразователя 16; $U_{\text{СД1}} = U_{\text{МП}} \cos \varphi$ – напряжение с первого синхронного детектора 20; $U_{\text{СД2}} = U_{\text{МП}} \sin \varphi$ – напряжение со второго синхронного детектора 21.

Из анализа формул (8) и (9) следует, что при использовании синхронных детекторов 20 и 21 (первый квадратурный фазовый детектор), фазовое рассогласование между опорными сигналами синхронных детекторов 20 и 21 и сигнала с масштабирующего преобразователя 16 не влияет на точность измерения его амплитудных и фазовых параметров. При этом каждый цикл измерения $T_{\text{ц}} = 1$ с так же, как в трассопоисковом генераторе 1, начинается по поступлению в микроконтроллер 24 синхронизирующих тактовых импульсов с Глонасс/GPS приемника 25. Поэтому собственная нестабильность частоты генераторов квадратурных сигналов (DDS генераторов 18 и 19) не оказывает никакого влияния на точность процесса измерения фазы.

Сравнивая фазу $\varphi_{\text{Г}}$, зафиксированную в трассопоисковом приемнике 2 в начальной точке обследования трубопровода, с текущими значениями $\varphi_{\text{МП}}$, определяем разность фаз

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{Г}} - \varphi_{\text{МП}}. \quad (10)$$

Очевидно, что значение $\Delta\varphi$ определяется временем распространения сигнала в исследуемом трубопроводе. В местах нарушения изоляции линейный характер изменения фазы прерывается и происходит ее скачок, который можно использовать для идентификации мест повреждения изоляции исследуемого объекта.

Важно подчеркнуть, что поскольку измерение как амплитудных, так и фазовых параметров сигналов происходит синхронно, то в моменты скачка фазы происходит также скачок тока, протекающего по объекту, что обеспечивает полную корреляцию процессов фазовой и амплитудной идентификации, а значит, увеличивает достоверность обнаружения мест повреждения изоляции исследуемого трубопровода. При этом относительная погрешность измерения разности фаз определяется только временем рассогласования тактовых секундных импульсов, поступающих с Глонасс/GPS приемников 3 и 25 соответственно в микроконтроллеры 4 и 24 трассопоисковых генератора 1 и приемника 2. С учетом, что расстояние между трассопоисковыми генератором 1 и приемником 2 не превышает нескольких километров, то нестабильность тактовых импульсов определяется только инструментальной погрешностью Глонасс/GPS приемников 3 и 25, которая не превышает ± 50 нс. При частоте сигнала 975 Гц фазовая погрешность $\Delta\varphi$ составляет $\pm 0,02^\circ$. Столь малая относительная погрешность позволяет использовать фазовый метод также для отсчета расстояния от точки привязки трассопоискового генератора до места повреждения изоляции, что, по сравнению с маркероискателями, значительно упрощает обозначение и повторный поиск дефектов исследуемого объекта, так как в этом случае не надо закапывать маркер для последующего его поиска. Достаточно только зафиксировать расстояние от места подключения трассопоискового генератора до места обнаружения дефекта (осуществляется автоматически) и сделать отметку в соответствующей документации. Погрешность обозначения дефектов на местности, с учетом линейного характера изменения фазы, определяется формулой

$$\Delta L_x = \frac{L_{\text{max}} \Delta\varphi}{360^\circ}, \quad (11)$$

где L_{max} – максимальное расстояние между пунктами подключения трассопоискового генератора.

Учитывая, что L_{max} не превышает нескольких километров, погрешность идентификации ΔL_x не превышает 10–20 см. Это означает, что влияние погрешности $\Delta\varphi$ практически не сказывается на точности идентификации мест повреждения исследуемого трубопровода.

Заключение

1. В работе рассмотрены, защищенные патентами РФ, методы электрометрической диагностики изоляционного покрытия трубопроводов, с использованием контактных и бесконтактных способов съема поверхностных потенциалов грунта.

2. Отличительной особенностью предложенных фазовых методов идентификации мест повреждения является применение ключевых синхронных детекторов, выходной сигнал которых определяется как амплитудными, так и фазовыми параметрами контролируемых испытательных сигналов. Такая полная корреляция измеряемых фазовых и амплитудных параметров повышает достоверность идентификации мест повреждения изоляционного покрытия трубопроводов.

3. Проблему пространственно разнесенных по длине трубопроводов генератора и приемника предложено решить с использованием квадратурных синхронных детекторов, синхронизированных сигналами Глонасс/GPS, что позволило применить «технологический прием» измерения фазы φ_r выходного сигнала генератора в начальной точке обследуемого трубопровода, а оценку параметров осуществить, используя широкополосную и помехоустойчивую оптимальную корреляционную обработку испытательных сигналов.

Библиографический список

1. ГОСТ Р54257–2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. – Москва, 2011.
2. СТО РД Газпром 39-1.10-088–2004. – Москва, 2004.
3. Сергованцев, В. Т. Газопровод как канал связи в системах телемеханики / В. Т. Сергованцев, В. А. Артемов, К. А. Канев. – Москва : Недры, 1984. – С. 6–15.
4. Пат. РФ 2413354. Двухканальный генератор гармонических сигналов / Григорьян Л. Р. ; зарег. 27.02.2011.
5. Пат. РФ 2463629. Трассопоисковый генератор сигналов / Богатов Н. М., Григорьян Л. Р., Митина О. Е., Сахно М. А. ; зарег. 10.10.2012.
6. Пат. РФ 175483. Трассопоисковый генератор сигналов / Богатов Н. М., Григорьян Л. Р. ; зарег. 06.12.2017.
7. Fischer, W. Probleme der IR-freien Potentialmessung in Gegenwart von Ausgleichsströmen / W. Fischer, H. Hildebrand, W. Prinz, W. Schwenk // Wertstoffe und Korrosionen. – 1988. – № 39. – P. 18–22.
8. Pearson, K. On the criterion that a given system of deviation from the problem in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling / K. Pearson // Philosophical Magazine Series. – 1900. – Ser. 5, vol. 50, iss. 302. – P. 157–175.
9. Глазков, В. И. Электрический метод нахождения сквозных повреждений в изоляционных покрытиях действующих магистральных трубопроводов / В. И. Глазков // Защита металлов. – 1965. – № 2. – С. 21.
10. Цнев, А. Н. Поиск повреждений изоляционных покрытий магистральных газопроводов без вскрытия в зоне постоянного действия блуждающих токов / А. Н. Цнев, В. В. Носов, М. Н. Назарова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4 (5-2). – С. 430–438.
11. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – Москва : Додэка-XXI, 2015. – 528 с.
12. Заявка на изобретение № 2019120637 Способ измерения сопротивления изоляционного покрытия трубопровода / Григорьян Л. Р. ; заявл. 03.07.2019.
13. ВРД-39-1.10-026-2001. Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов.
14. Пат. РФ 2414719. Измерительный комплекс для поиска и диагностики подземных коммуникаций / Григорьян Л. Р. ; зарег. 20.03.2011.
15. Пат. РФ 2687236. Измерительный комплекс для поиска и диагностики подземных коммуникаций / Григорьян Л. Р., Богатов Н. М. ; зарег. 08.05. 2019.
16. Фалькович, С. Е. Оценка параметров сигнала / С. Е. Фалькович. – Москва : Советское радио, 1970. – 336 с.

References

1. GOST R54257–2010. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozheniya i trebovaniya* [GOST R54257-2010. Reliability of building structures and foundations. Main provisions and requirements]. Moscow, 2011. [In Russian]
2. STO RD *Gazprom 39-1.10-088–2004*. Moscow, 2004. [In Russian]
3. Sergovantsev V. T., Artemov V. A., Kanev K. A. *Gazoprovod kak kanal svyazi v sistemakh telemekhaniki* [Gas pipeline as a communication channel in telemechanics systems]. Moscow: Nedry, 1984, pp. 6–15. [In Russian]
4. Pat. RF 2413354. *Dvukhkanal'nyy generator garmonicheskikh signalov* [Pat. RF 2413354. Two-channel harmonic signal generator]. Grigor'yan L. R.; reg. 27.02.2011. [In Russian]

5. Pat. RF 2463629. *Trassoposkovyy generator signalov* [Pat. RF 2463629. Traceroute signal generator]. Bogatov N. M., Grigor'yan L. R., Mitina O. E., Sakhno M. A.; reg. 10.10.2012. [In Russian]
6. Pat. RF 175483. *Trassoposkovyy generator signalov* [Pat. RF 175483. Traceroute signal generator]. Bogatov N. M., Grigor'yan L. R.; reg. 06.12.2017. [In Russian]
7. Fischer W., Hildebrand H., Prinz W., Schwenk W. *Wertstoffe und Korrosionen* [Materials and corrosion]. 1988, no. 39, pp. 18–22.
8. Pearson K. *Philosophical Magazine Series*. 1900, ser. 5, vol. 50, iss. 302, pp. 157–175.
9. Glazkov V. I. *Zashchita metallov* [Protection of metals]. 1965, no. 2, p. 21. [In Russian]
10. Tsenev A. N., Nosov V. V., Nazarova M. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical Bulletin]. 2017, no. 4 (5-2), pp. 430–438. [In Russian]
11. Volovich G. I. *Skhemitekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv* [Circuit design of analog and analog-to-digital electronic devices]. Moscow: Dodeka-XXI, 2015, 528 p. [In Russian]
12. *Zayavka na izobretenie № 2019120637 Sposob izmereniya soprotivleniya izolyatsionnogo pokrytiya truboprovoda* [Application for invention No. 2019120637 Method for measuring the resistance of the insulation coating of a pipeline]. Grigor'yan L. R.; appl. 03.07.2019. [In Russian]
13. VRD-39-1.10-026-2001. *Metodika otsenki fakticheskogo polozheniya i sostoyaniya podzemnykh truboprovodov* [VRD-39-1.10-026-2001. Methodology for assessing the actual position and condition of underground pipelines]. [In Russian]
14. Pat. RF 2414719. *Izmeritel'nyy kompleks dlya poiska i diagnostiki podzemnykh kommunikatsiy* [Pat. RF 2414719. Measuring complex for searching and diagnostics of underground communications]. Grigor'yan L. R.; reg. 20.03.2011. [In Russian]
15. Pat. RF 2687236. *Izmeritel'nyy kompleks dlya poiska i diagnostiki podzemnykh kommunikatsiy* [Pat. RF 2687236. Measuring complex for searching and diagnostics of underground communications]. Grigor'yan L. R., Bogatov N. M.; reg. 08.05. 2019. [In Russian]
16. Fal'kovich, S. E. *Otsenka parametrov signala* [Estimation of parameters of signal]. Moscow: Sovetskoe radio, 1970, 336 p. [In Russian]

Григорьян Леонтий Рустемович

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра физики и информационных систем,
Кубанский государственный университет
(Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149)
E-mail: leonmezon@mail.ru

Grigor'yan Leontiy Rustemovich

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of physics and information systems,
Kuban State University
(149 Stavropol'skaya street, Krasnodar, Russia)

Богатов Николай Маркович

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики
и информационных систем,
Кубанский государственный университет
(Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149)
E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

Bogatov Nikolay Markovich

doctor of physical and mathematical sciences,
professor,
head of sub-department of physics
and information systems,
Kuban State University
(149 Stavropol'skaya street, Krasnodar, Russia)

Образец цитирования:

Григорьян, Л. Р. Применение фазовых методов в идентификации мест повреждения изоляционного покрытия трубопроводов / Л. Р. Григорьян, Н. М. Богатов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 48–57. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-6.

В. С. Волков, Н. В. Волкова, М. С. Конкина

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ
РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЧАСТОТУ**

V. S. Volkov, N. V. Volkova, M. S. Konkina

**THE ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES
OF USING SEMICONDUCTOR STRAIN GAGES
TO BUILD FREQUENCY INTEGRATING UNFOLDING
CONVERTERS OF MECHANICAL VALUES INTO FREQUENCY**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью исследования является анализ возможностей применения мостовых схем с полупроводниковыми тензорезисторами совместно с частотными интегрирующими и развертывающими преобразователями для создания чувствительных элементов датчиков, работоспособных в условиях повышенных температур. **Материалы и методы.** Применены классические методы физики полупроводников, полупроводниковой тензометрии и электрических цепей постоянного и переменного тока для расчета зависимости сопротивления полупроводникового тензорезистора от деформации и температуры и частоты напряжения на выходе ЧИРП. **Результаты.** Получено выражение для выходного сигнала частотного интегрирующего развертывающего преобразователя с полупроводниковой мостовой схемой, доказывающее, что учет температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов приводит к появлению зависимости выходной частоты от температуры, а также проведены расчеты численных характеристик выходного сигнала ЧИРП и его температурной погрешности с учетом числовых значений параметров мостовой схемы с полупроводниковыми тензорезисторами. **Выводы.** На основании проведенных расчетов сделан вывод, что вследствие температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов возникает дополнительная мультипликативная составляющая погрешности выходной частоты ЧИРП, и, как следствие, требуется разработка дополнительных методов и средств температурной компенсации с учетом особенностей полупроводниковых тензорезисторов.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is analyzing the possibilities of using bridge circuits with semiconductor strain gages in conjunction with frequency integrating and deploying converters to create sensitive sensor elements that work under high temperatures. **Materials and methods.** Methods of semiconductor physics, semiconductor tensometry, and DC and AC electrical circuits for calculating the dependence of the resistance of a semiconducting resistive-strain gauge on the strain and temperature and frequency of the voltage at the output of the FIUC. **Results.** The resulting expression for the output signal frequency integrating deployer converter with a semiconductor rectifier circuit, proving that accounting for the

temperature dependence of the stress sensitivity of semiconducting resistive-strain leads to a dependence of the output frequency of the temperature, and the calculations of numerical characteristics of the output FIUC signal and temperature error taking into account the typical parameters of the bridge circuit with semiconducting resistive-strain gauges. **Conclusions.** Based on the calculations made, it is concluded that due to the temperature dependence of the strain sensitivity of semiconductor strain gages, an additional multiplicative component of the error of the output frequency of the FIUC occurs, and, as a result, it is necessary to develop additional methods and means of temperature compensation, taking into account the features of semiconductor strain gages.

К л ю ч е в ы е с л о в а: чувствительный элемент, МЭМС-технологии, полупроводниковый тензорезистор, мостовая схема, тензочувствительность, частотный интегрирующий развертывающий преобразователь (ЧИРП).

К e y w o r d s: sensitive element, MEMS technologies, semiconducting resistive-strain gauge, bridge circuit, strain sensitivity, frequency integrating unfolding converter (FIUC).

Введение

К современным средствам измерений механических величин предъявляются высокие требования по точности и чувствительности одновременно с уменьшением массы и габаритных размеров. Поскольку основной вклад в характеристики датчика вносят характеристики чувствительно элемента (ЧЭ), то наиболее перспективной тенденцией совершенствования средств измерений представляется использование МЭМС-технологий для изготовления датчиков для измерения давления, перемещения, деформации, крутящего момента и т.д. В то же время в последние десятилетия электронная компонентная база измерительных приборов и систем была значительно усовершенствована, что открывает новые возможности по созданию средств измерений с цифровым выходным сигналом. Таким образом, сочетание перспективных МЭМС-технологий и цифровых методов преобразования и обработки измерительных сигналов позволит совершить качественный скачок в научно-технической сфере Российской Федерации, что напрямую позволяет решить задачи по внедрению и развитию цифровой экономики, поставленные, в частности, в Указе президента РФ от 7 мая 2018 г. [1].

Одним из наиболее простых методов создания датчиков механических величин с цифровым выходным сигналом является преобразование параметров датчиков в частоту, обладающее рядом достоинств. Во-первых, при использовании частотных преобразователей открывается возможность достижения более высокой точности измерения, чем в преобразователях амплитуд сигналов. Во-вторых, частотный сигнал обладает высокой помехоустойчивостью и малой чувствительностью к изменению параметров линий связи. В-третьих, обработка частотных сигналов и их точное интегрирование по времени выполняются достаточно просто. Одним из наиболее перспективных направлений создания частотных преобразователей параметров датчиков резистивного типа является построение их на основе метода интегрирующего развертывающего преобразования. Достоинствами таких преобразователей являются широкие функциональные возможности, помехоустойчивость, относительная простота реализации и настройки схем, технологичность изготовления [2, 3].

При этом одним из наиболее распространенных и технически отработанных принципов действия ЧЭ является использование тензорезистивной мостовой схемы. Со второй половины 20 века в мостовых схемах широко применяются полупроводниковые тензорезисторы, обладающие значительно более высокой тензочувствительностью, чем металлические. Применение для их изготовления МЭМС-технологий позволило получать ЧЭ размером не более единиц миллиметров с минимальным энергопотреблением и высокой чувствительностью. Следовательно, перспективным направлением совершенствования датчиков механических величин представляется сочетание полупроводниковых тензорезистивных мостовых схем и методов преобразования выходного напряжения мостовой схемы в частоту [2, 6–12]. Известным недостатком полупроводниковых тензорезисторов является значительная температурная зависимость характеристик (сопротивления и тензочувствительности), которая требует примене-

ния методов температурной компенсации при создании ЧЭ датчиков, работоспособных в условиях повышенных температур [4, 5].

Частотные измерительные преобразователи параметров резистивных датчиков с использованием методов интегрирующего развертывающего преобразования (ЧИРП) в настоящее время являются перспективными средствами построения систем измерения и управления благодаря высокой помехозащищенности выходного сигнала, а также простому преобразованию его в цифровой код [2, 6–12].

Большинство технических решений частотных преобразователей сигналов содержат на входе мостовые измерительные схемы с металлическими тонкопленочными тензо- и терморезисторами, служащие для преобразования давления, действующего на упругий элемент в виде круглой жесткозашемленной мембраны, в электрическое напряжение, при этом выход мостовой схемы подключен к СИРП на основе операционных усилителей (рис. 1) [2]. Основным недостатком данных частотных преобразователей является повышение температуры резисторов мостовой схемы, в том числе вследствие саморазогрева, что приводит к появлению дополнительной температурной погрешности выходного сигнала [2].

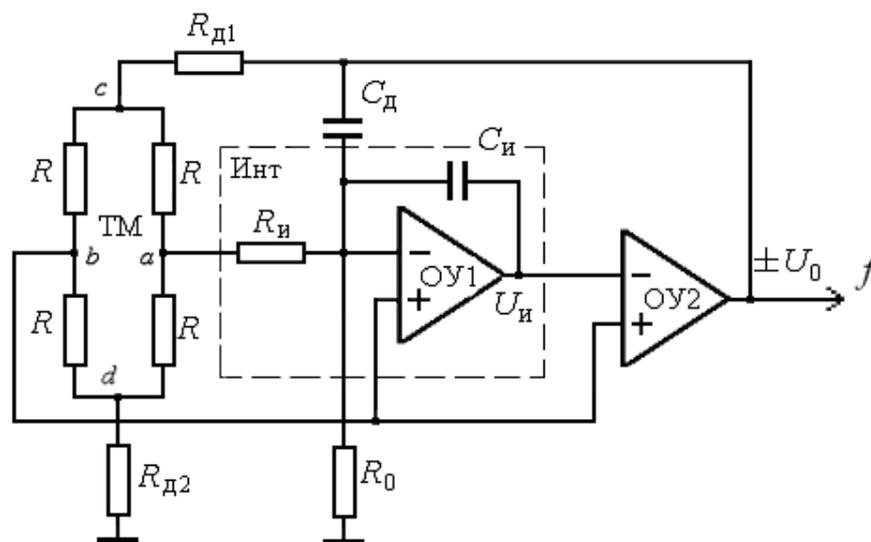


Рис. 1. Функциональная схема ЧИРП с мостовой тензорезистивной схемой [1]

Учеными Пензенского государственного университета разработано и запатентовано несколько технических решений, направленных на снижение дополнительной температурной погрешности ЧИРП с мостовой резистивной схемой [6–12]. Однако данные технические решения посвящены ЧИРП с тензомостами на основе металлопленочных тензорезисторов, которые характеризуются относительно низкой тензочувствительностью (приблизительной равной 2), а также преобладанием аддитивной составляющей температурной погрешности выходного сигнала тензомоста, вызванной зависимостью номинального сопротивления металлического тензорезистора от температуры. В то же время для полупроводниковых тензорезисторов характерна высокая тензочувствительность (100 и выше), а также наличие существенной зависимости тензочувствительности от температуры, что является причиной появления значительной мультипликативной составляющей выходного сигнала мостовой схемы. Поэтому известные схемы ЧИРП мостовых тензосхем не учитывают особенностей полупроводниковых тензорезисторов и не могут обеспечить заданную точность при их работе в условиях повышенных температур.

Известно, что зависимость сопротивления полупроводникового тензорезистора от деформации и температуры определяются выражением

$$R(\varepsilon, T) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)(1 \pm k_0(1 + \gamma \cdot \Delta T)\varepsilon), \quad (1)$$

где R_0 – номинал тензорезистора при нормальной температуре, α – температурный коэффициент сопротивления, k_0 – коэффициент тензочувствительности тензорезистора при нормальной

температуре, ε – относительная деформация тензорезистора, γ – температурный коэффициент тензочувствительности, ΔT – диапазон изменения рабочей температуры тензорезистора [5].

Рассмотрим тензопреобразователь, состоящий из мостовой схемы (МС), содержащей полупроводниковые тензорезисторы, интегратор на базе операционного усилителя ОУ₁ с емкостной отрицательной обратной связью, сравнивающее устройство СУ на базе ОУ₂ и дозирующий конденсатор C_d (см. рис. 1) [2].

В установленном режиме работы устройства с выхода сравнивающего устройства ОУ₂ следуют разнополярные импульсы амплитудой $\pm U_0$. Пусть в момент времени t_1 произошла смена полярности выходного напряжения с минус U_0 на $+U_0$. При этом напряжение на выходе интегратора обусловлено положительным «скачком» напряжения с одной из вершин измерительной диагонали тензометрического моста, равным $0,5U_0(1+\varepsilon_m)$, где $\varepsilon_m = \Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления МС, и отрицательным «скачком» через дозирующий конденсатор C_d , равным $-2(C_d/C_n)U_0$, где C_n – значение емкости интегратора [2].

Под действием напряжения разбаланса МС, равного $-\varepsilon_m U_0$, напряжение на выходе интегратора будет увеличиваться до положительного порогового уровня блока сравнения ОУ₂, равного $\frac{U_0}{2}(1+\varepsilon_m)$.

В момент равенства порога срабатывания и напряжения на выходе интегратора вновь произойдет смена полярности выходного напряжения.

При этом напряжение на выходе интегратора будет равно

$$U_n(t_2) = \frac{U_0}{2}(1+\varepsilon_m) - 2\frac{C_d}{C_n}U_0 + \varepsilon_m U_0 \frac{t_2 - t_1}{\tau_n}, \quad (2)$$

где $\tau_n = R_n C_n$ – постоянная времени интегратора [2].

Для момента равенства напряжений на выходе интегратора и порогового уровня СУ справедливо выражение

$$\frac{U_0}{2}(1+\varepsilon_m) = \frac{U_0}{2}(1+\varepsilon_m) - 2\frac{C_d}{C_n}U_0 + \varepsilon_m U_0 \frac{T}{2R_n C_n}, \quad (3)$$

где T – период следования выходного напряжения.

Из выражения (3) определяем частоту выходного сигнала

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\varepsilon_m}{4R_n C_n}. \quad (4)$$

При учете температурной зависимости параметров полупроводникового тензорезистора в соответствии с уравнением (1) выражение для относительного изменения сопротивления первого тензорезистора будет иметь вид

$$\varepsilon_R = \frac{R_1 - R_0}{R_0} = \alpha \Delta T - k_0 \varepsilon - k_0 \varepsilon \gamma \Delta T - k_0 \varepsilon \alpha \Delta T - k_0 \varepsilon \alpha \gamma \Delta T^2. \quad (5)$$

Тогда относительные изменения сопротивления правого полумоста, состоящего из тензорезисторов R_1 и R_2 , будет равно

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} + \frac{k_0 \varepsilon}{2} + \frac{k_0 \varepsilon \gamma \Delta T}{2} + \frac{k_0 \varepsilon}{2\alpha \Delta T} + \frac{k_0 \varepsilon \gamma}{2\alpha}. \quad (6)$$

С учетом выражения (1) формула (3) преобразуется следующим образом:

$$U_0(\varepsilon_{12}) = U_0(\varepsilon_{12}) - 2\frac{C_d}{C_n}U_0 + U_0 \left(\frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right) \frac{T}{2R_n C_n}. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) с учетом уравнения (1) дает следующее выражение для выходного сигнала ЧИРП:

$$f = \frac{k_0 \varepsilon (1 + \gamma \Delta T)}{4C_d R_i} \quad (8)$$

Как видно из формулы (8), учет температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов приводит к появлению зависимости выходной частоты от температуры, т.е. дополнительной мультипликативной составляющей погрешности.

Для оценки численных характеристик ЧИРП МС с полупроводниковыми тензорезисторами рассмотрим типичные параметры МС: номинальное сопротивление тензорезистора $R_0 = 1000$ Ом, коэффициент тензочувствительности $k_0 = 100$, деформация тензорезисторов $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$, емкость дозирующего конденсатора $C_d = 100$ пкФ, сопротивление интегратора $R_i = 50 R_0$, ТКЧ тензорезисторов $\gamma = 0,0012 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, диапазон рабочих температур $\Delta T = 100$ °С.

Тогда рассчитанное по формуле (2) номинальное значение частоты выходного сигнала будет оставлять $2,5 \cdot 10^3$ Гц, а значение частоты при разности температур $\Delta T = 100$ °С, определенное по формуле (4), будет составлять $2,8 \cdot 10^3$ Гц. При этом погрешность выходной частоты составит 12 %, что не соответствует требованиям по точности, предъявляемым к современным датчикам физических величин.

Таким образом, применение ЧИРП для преобразования разбаланса мостовой схемы с полупроводниковыми тензорезисторами является перспективным направлением развития измерительной техники благодаря миниатюрности, высоким массогабаритным показателям и низкому энергопотреблению, но в то же время требует разработки дополнительных методов и средств компенсации температурной погрешности выходной частоты.

Заключение

Применение полупроводниковых тензорезисторов для создания чувствительных элементов датчиков механических величин совместно с частотными интегрирующими и развертывающими преобразователями позволяет создавать современные датчики с цифровым выходным сигналом, отличающиеся высокой чувствительностью, малой массой и габаритами, относительно невысоким энергопотреблением. Однако наличие температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых материалов требует разработки новых технических решений, направленных на повышение точности в условиях воздействия повышенных температур.

Библиографический список

1. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : указ Президента от 7 мая 2018 г.
2. Громков, Н. В. Интегрирующие развертывающие преобразователи параметров датчиков систем измерения, контроля и управления : монография / Н. В. Громков. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. – 244 с.
3. Волков, В. С. Современные направления развития преобразователей давления с частотным выходным сигналом / В. С. Волков, Д. А. Кудрявцева, И. Р. Вергазов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 20–29.
4. Кучумов, Е. В. Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринев, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
5. Волков, В. С. Исследование влияния концентрации легирующей примеси на температурную зависимость тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов / В. С. Волков, Е. А. Рыблова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 40–47.
6. А.с. СССР № 828406. Преобразователь сигнала разбаланса тензомоста в частоту / Громков Н. В., Михотин В. Д., Шахов Э. К., Шляндин В. М. ; Б.И.; 1981, № 17.
7. А.с. СССР № 828097 Интегрирующий преобразователь разбаланса тензомоста в частоту следования импульсов / Громков Н. В., Шахов С. Б., Шахов Э. К., Шляндин В. М. ; опубл. в Б.И., 1981, № 13.
8. А.с. СССР по заявке № 2918747/21 Частотный преобразователь для тензодатчиков / Громков Н. В. Михотин В. Д., Шахов С. Б., Шахов Э. К., Шляндин В. М.

9. Патент RU 2398196 Устройство для измерения давления на основе нано- и микроэлектромеханической системы с частотным выходным сигналом / Васильев В. А., Громков Н. В. ; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24.
10. Патент RU 2395060 Частотный преобразователь сигнала разбаланса тензомоста с уменьшенной температурной погрешностью / Васильев В. А., Громков Н. В. ; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.
11. Патент RU 2430342 Полупроводниковый датчик давления с частотным выходным сигналом / Васильев В. А., Громков Н. В., Москалев С. А. ; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27.
12. Патент RU 2631494 Универсальный модуль частотного интегрирующего развертывающего преобразователя для датчиков физических величин / Васильев В. А., Громков Н. В., Жоао А. Ж. ; опубл. 20.09.2017, Бюл. № 27.

References

1. *O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda: ukaz Prezidenta ot 7 maya 2018 g.* [On national goals and strategic development goals of the Russian Federation for the period up to 2024: presidential decree of may 7, 2018]. [In Russian]
2. Gromkov N. V. *Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli parametrov datchikov sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: monografiya* [Integrating deployable converters of sensor parameters of measurement, control and control systems: monograph]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2009, 244 p. [In Russian]
3. Volkov V. S., Kudryavtseva D. A., Vergazov I. R. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 20–29. [In Russian]
4. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2 (8), pp. 58–65. [In Russian]
5. Volkov V. S., Ryblova E. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 2 (20), pp. 40–47. [In Russian]
6. A.s. SSSR № 828406. *Preobrazovatel' signala razbalansa tenzomosta v chastotu* [A. S. USSR No. 828406. Converter of the load cell unbalance signal to frequency]. Gromkov N. V., Mikhotin V. D., Shakhov E. K., Shlyandin V. M.; bull.; 1981, no. 17. [In Russian]
7. A.s. SSSR № 828097 *Integriruyushchiy preobrazovatel' razbalansa tenzomosta v chastotu sledovaniya impul'sov* [A. S. USSR no 828097 Integrating Converter of the strain bridge unbalance into the pulse repetition frequency]. Gromkov N. V., Shakhov S. B., Shakhov E. K., Shlyandin V. M.; publ. in bull., 1981, no. 13. [In Russian]
8. A.s. SSSR po zayavke № 2918747/21 *Chastotnyy preobrazovatel' dlya tenzodatchikov* [A. S. USSR on request No. 2918747/21 Frequency Converter for load cells]. Gromkov H. B. Mikhotin V. D., Shakhov S. B., Shakhov E. K., Shlyandin B. M. [In Russian]
9. Patent RU 2398196 *Ustroystvo dlya izmereniya davleniya na osnove nano- i mikroelektromekhanicheskoy sistemy s chastotnym vykhodnym signalom* [Patent RU 2398196 pressure measuring Device based on a nano - and microelectromechanical system with a frequency output signal]. Vasil'ev V. A., Gromkov N. V.; publ. 27.08.2010, bull. no. 24. [In Russian]
10. Patent RU 2395060 *Chastotnyy preobrazovatel' signala razbalansa tenzomosta s umen'shennoy temperaturnoy pogreshnost'yu* [Patent RU 2395060 Frequency Converter of the load cell unbalance signal with reduced temperature error]. Vasil'ev V. A., Gromkov N. V.; publ. 20.07.2010, bull. no. 20. [In Russian]
11. Patent RU 2430342 *Poluprovodnikovyy datchik davleniya s chastotnym vykhodnym signalom* [Patent RU 2430342 solid State pressure sensor with frequency output signal]. Vasil'ev V. A., Gromkov N. V., Moskalev S. A.; publ. 27.09.2011, bull. no. 27. [In Russian]
12. Patent RU 2631494 *Universal'nyy modul' chastotnogo integriruyushchego razvertyvayushchego preobrazovatelya dlya datchikov fizicheskikh velichin* [Patent RU 2631494 Universal module of frequency integrating unfolding Converter for physical quantity sensors]. Vasil'ev V. A., Gromkov N. V., Zhoao A. Zh.; publ. 20.09.2017, bull. no. 27. [In Russian]

Волков Вадим Сергеевич

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

Volkov Vadim Sergeevich

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

Волкова Наталия Валентиновна

кандидат биологических наук, доцент,
заведующий кафедрой химии, теории
и методики обучения химии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Volkova Nataliya Valentinovna

candidate of biological sciences, associate professor,
head of sub-department of chemistry, theory
and methods of teaching chemistry,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Конкина Мария Сергеевна

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

Konkina Maria Sergeevna

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

Образец цитирования:

Волков, В. С. Анализ возможностей применения полупроводниковых тензорезисторов для построения частотных интегрирующих развертывающих преобразователей механических величин в частоту / В. С. Волков, Н. В. Волкова, М. С. Конкина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 58–64. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-7.

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 615.47:616–072.7

DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-8

М. Н. Крамм

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР СЕРДЦА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

M. N. Kramm

EQUIVALENT ELECTRIC HEART GENERATOR FOR NON-INVASIVE ELECTROCARDIAC DIAGNOSTICS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается способ повышения эффективности неинвазивной кардиодиагностики, основанный на переходе от многоканальных электрокардиосигналов и связанных с ними карт распределения электрического потенциала на поверхности торса к пространственно-временным характеристикам эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС). **Материалы и методы.** Проводится реконструкция распределения эквивалентных электрических источников в сердце в течение кардиоцикла. При обработке используются как записанные электрокардиосигналы, так и координаты электродов на поверхности торса человека. **Результаты.** Представлены карты распределений электрического потенциала на поверхности сердца в различные моменты времени для ЭЭГС поверхностного типа и пространственные треки временной динамики электрической активности сердца в объеме сердца для ЭЭГС дипольного типа. **Выводы.** Результаты реконструкции ЭЭГС показывают возможность наблюдения карт пространственно-временной динамики электрической активности сердца и предназначены для повышения информативности электрокардиографических обследований.

A b s t r a c t. Background. We consider a method for increasing the effectiveness of non-invasive cardiognostics, based on the transition from multichannel electrocardiosignals and related electrical potential distribution maps on the torso surface to the spatio-temporal characteristics of the equivalent electric heart generator (EEHG). **Materials and methods.** We carry out reconstruction of the distribution of the equivalent electrical heart sources of the cardiac cycle. When processing we use both recorded electrocardiosignals and the coordinates of the electrodes, placed on the human torso surface. **Results.** We obtain maps of electric potential distributions on the heart surface at various time points for surface type EEHG and spatial tracks of the temporal dynamics of the heart electrical activity in the volume of the heart for dipole type EEHG. **Conclusions.** The results of the EEHG reconstruction show the possibility of observing the spatio-temporal dynamics maps of the electrical heart activity and are intended to increase the informativeness of electrocardiographic examinations.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрокардиографические отведения, электрический потенциал, торс, сердце, реконструкция, эквивалентный электрический генератор сердца, карты распределений.

Keywords: electrocardiographic leads, electric potential, torso, heart, reconstruction, equivalent electric heart generator, maps of distributions.

Введение

Современная неинвазивная электрокардиология широко использует информационные технологии (ИТ), обеспечивающие регистрацию, сбор, хранение и обработку кардиографической информации. В настоящее время этот своеобразный технологический «конвейер» неинвазивной электрокардиологии помогает врачу при формировании заключения о состоянии сердца пациента [1, 2].

В качестве важного этапа этого конвейера следует рассматривать решение обратной задачи электрокардиографии путем реконструкции эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС), которое позволяет неинвазивным путем визуализировать характеристики электрической активности в области сердца [3–5]. При этом повышение достоверности электрокардиодиагностики в отношении получения новой диагностической информации связано с одновременным представлением кардиологам пространственно-временных характеристик как ЭЭГС поверхностного типа – для диагностики нарушения процессов проводимости, так и ЭЭГС дипольного типа – для диагностики ишемии. Предлагается переход от распределений потенциала электрического поля на поверхности торса (карт потенциала на поверхности торса) – к картам распределения источников электрической активности на поверхности эпикарда и пространственно-временным характеристикам электрической активности ЭЭГС дипольного типа в объеме сердца [6]. Существенно также, что такой переход ориентирован на наблюдение более мелких деталей в динамике электрической активности сердца.

Постановка задачи

Многоканальные электрокардиосигналы (ЭКС) регистрируются с помощью системы электродов, распределенных на поверхности грудной клетки в количестве 40–60. После цифровой фильтрации мы располагаем для каждого отсчетного момента времени кардиоцикла массивом значений электрического потенциала в точках расположения электродов. Поскольку электрический потенциал, зарегистрированный с некоторого электрода, является интегральной характеристикой источников электрической активности в сердце, то для получения более детальной кардиографической информации мы решаем обратную задачу – проводим реконструкцию эквивалентного электрического генератора сердца. При этом существенной информацией являются координаты электродов на поверхности торса и опорных точек на поверхности эпикарда. Координаты электродов определяются путем измерения антропометрических параметров на торсе. Координаты точек на поверхности эпикарда определяются путем реконструкции этой поверхности на основе известных координат электродов и электрических потенциалов на этих электродах [7].

Реконструкция эквивалентного электрического генератора сердца поверхностного типа

Электрические потенциалы регистрировались с помощью многоэлектродной системы отведений, показанной на рис. 1 [3]. Электроды были размещены на эластичных поясах на торсе в количестве около 40 в 4–5 рядов (рис. 1,а). После антропометрических измерений определялись координаты электродов x , y и z (рис. 1,а и б).

Пусть $\vec{r}_i = [x_i, y_i, z_i]$, $i = 1..N_e$ – векторы с координатами электродов на поверхности торса. Далее осуществляется переход к достаточно мелкой сетке граничных элементов на поверхности торса с координатами центров этих элементов $[x_k, y_k, z_k]$, $k = 1..N_b$, причем $N_b \gg N_e$. На следующем этапе необходимо путем интерполяции перейти от электрических потенциалов ϕ_i^b , $i = 1..N_e$, измеренных в точках расположения электродов \vec{r}_i , к потенциалам ϕ_k^b , $k = 1..N_b$ на мелкой сетке граничных элементов с центрами $\vec{r}_k = [x_k, y_k, z_k]$. Переход к мелкой сетке граничных элементов путем выполнения интерполяции важен для расширения частотного диапазона пространственного спектра распределения потенциала на эпикарде [8].

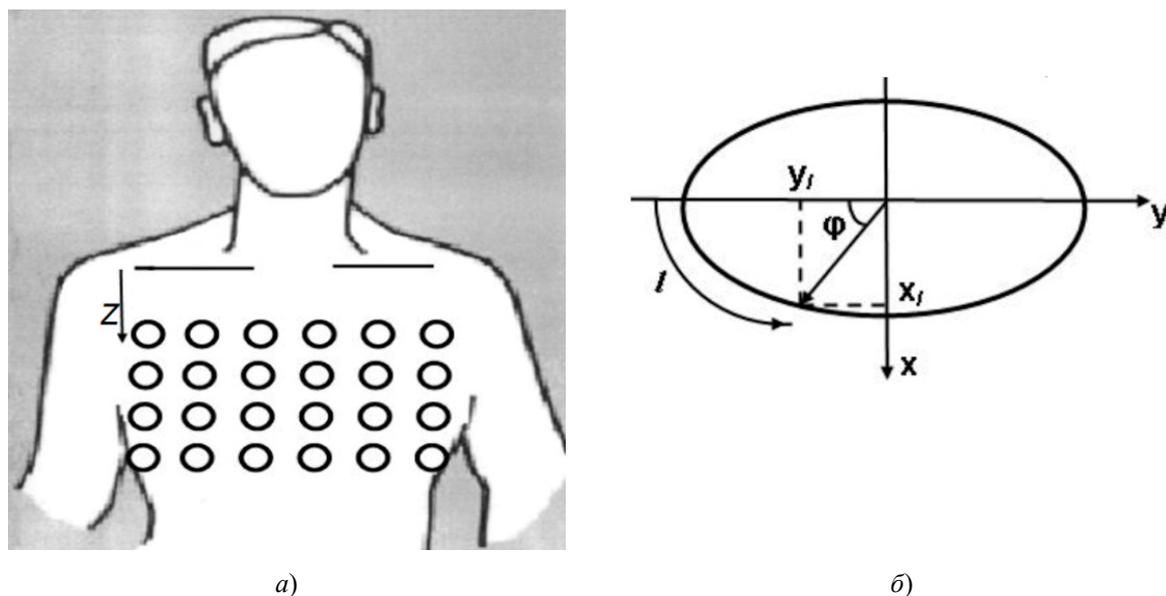


Рис. 1. Многоэлектродная система отведений:
 а – расположение электродов на торсе; б – координаты электродов

Наиболее распространенным способом отображения электрической активности сердца на базе ЭЭГС поверхностного типа (ЭЭГС ПТ) является визуализация распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда [7]. В этом случае говорят о распределении поверхностной плотности дипольного момента электрических источников, которое отражает распределение эквивалентного трансмембранного потенциала на поверхности сердца.

В работе [9], основываясь на теореме Грина [10], показано, что

$$2\pi \cdot u(M) = \int_{S_H} g(P) \cdot \frac{1}{R(M,P)} dS - \int_{S_H} \phi(P) \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R(M,P)} \right) dS - \int_{S_B} \phi(P) \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R(M,P)} \right) dS,$$

где ϕ – электрический потенциал; M – точка, которая может находиться на поверхности торса S_B или на поверхности эпикарда S_H ; P – текущая точка интегрирования; $R(M,P)$ – расстояние между точками M и P ; $\partial/\partial n$ – производная по направлению нормали, внешней по отношению к области между поверхностью торса и поверхностью эпикарда; $g = \frac{\partial \phi}{\partial n}$.

При этом в случае нахождения точки M на поверхности интегрирования эта точка должна быть «выколота», т.е. соответствующий интеграл следует рассматривать как несобственный интеграл второго рода.

В рамках метода граничных элементов (МГЭ) [11] в результате дискретизации поверхностей S_B и S_H получаем систему линейных алгебраических уравнений, которая может быть решена итерационным методом Зейделя [12] с последовательным использованием обратных матриц.

В качестве примера рассмотрим результаты реконструкции ЭЭГС ПТ по реальным ЭКС. ЭКС зарегистрированы с помощью 36 электродов, размещенных в четыре ряда на поверхности грудной клетки. Поверхность торса представлялась с помощью сетки, содержащей 30 элементов по вертикали и 60 элементов в горизонтальной плоскости. Использовалась реалистическая триангуляционная модель эпикарда, содержащая 1584 элемента. Реконструкция проводилась в характерные моменты времени, соответствующие вершинам P , R и T зубцов.

Результаты реконструкции ЭЭГС ПТ для данных моментов времени представлены на рис. 2 в виде карт распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда.

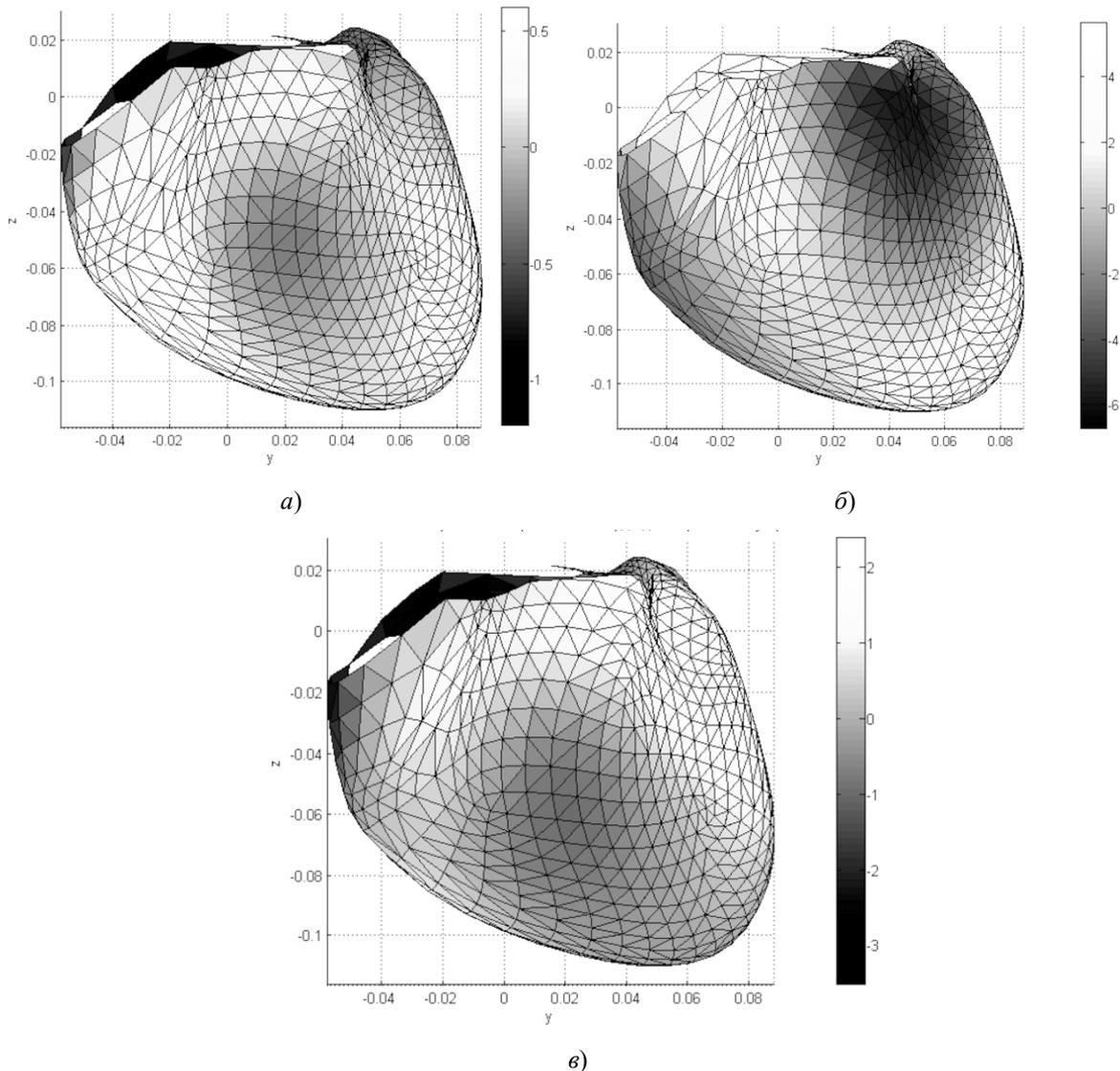


Рис. 2. Потенциал на поверхности эпикарда для вершины P -зубца (а); R -зубца (б); T -зубца (в)

Для большей наглядности полутоновая палитра на представленных рисунках выбрана с одинаковым контрастом, который соответствует различным диапазонам изменения электрического потенциала в мВ. Как и следовало ожидать, наибольшие значения потенциала наблюдаются для вершины R -зубца, наименьшие – для вершины P -зубца. Наиболее заметна дипольная структура электрического источника для R -зубца. Располагая значениями потенциалов в различные моменты времени кардиоцикла, можно наблюдать ЭКС непосредственно на поверхности эпикарда.

Реконструкция эквивалентного электрического генератора сердца дипольного типа

С целью наблюдения временной динамики электрической активности сердца ЭЭГС дипольного типа (ЭЭГС ДТ) реконструируется для каждого отсчетного момента времени кардиоцикла. Исходными данными для реконструкции ЭЭГС для момента t_k является вектор измеренных ЭКС $U_k = (U_1(t_k), \dots, U_n(t_k), \dots, U_{N_l}(t_k))$, где $U_n(t_k)$ – ЭКС, снимаемый с n -го электрода, N_l – количество используемых электродов. Также должны быть измерены координаты электродов (x_{ln}, y_{ln}, z_{ln}) , $n \in (1, N_l)$ в системе координат торса. ЭЭГС дипольного типа для всех временных отсчетов кардиоцикла t_k характеризуется вектором параметров $s_k = (x_{sk}, y_{sk}, z_{sk}, M_{xk}, M_{yk}, M_{zk})$, где (x_{sk}, y_{sk}, z_{sk}) – координаты ЭЭГС, (M_{xk}, M_{yk}, M_{zk}) – проекции вектора дипольного момента ЭЭГС [6].

Поскольку задача реконструкции относится к классу математически некорректных задач [13], то для ее решения необходимо решить оптимизационную задачу – найти для всех временных отсчетов кардиоцикла t_k вектор параметров ЭЭГС, при котором достигается минимум функционала

$$\Omega_\alpha = \|U_k - \tilde{U}(s_k)\|^2 + \alpha_k \|s'_k\|^2,$$

где $\tilde{U}(s_k) = (U_1(s_k), \dots, U_n(s_k), \dots, U_{N_i}(s_k))$ – вектор ЭКС, рассчитанных по дипольной модели ЭЭГС с вектором параметров s_k ; $U_n(s_k)$ – модельный ЭКС для n -го электрода; α_k – коэффициент регуляризации; $s'_k = \left(\frac{x_{s_k} - x_{ce}}{R_H}, \frac{y_{s_k} - y_{ce}}{R_H}, \frac{z_{s_k} - z_{ce}}{R_H}, \frac{M_{xk}}{M_{HR}}, \frac{M_{yk}}{M_{HR}}, \frac{M_{zk}}{M_{HR}} \right)$ – нормированный вектор параметров модели ЭЭГС; (x_{ce}, y_{ce}, z_{ce}) – координаты центра модели эпикарда пациента; R_H – усредненный радиус эпикарда; M_{HR} – модуль вектора дипольного момента ЭЭГС дипольного типа для временного отсчета максимума R -зубца кардиоцикла. Вопрос выбора коэффициента регуляризации рассмотрен нами в работе [14].

Временная динамика поведения ЭЭГС ДТ в ходе кардиоцикла может наглядно отображаться пространственными кривыми, характеризующими движение источника в пространстве и движение конца вектора дипольного момента. В качестве примера на рис. 3 показаны треки – линии движения источника для P -, R - и T -зубцов во фронтальной плоскости.

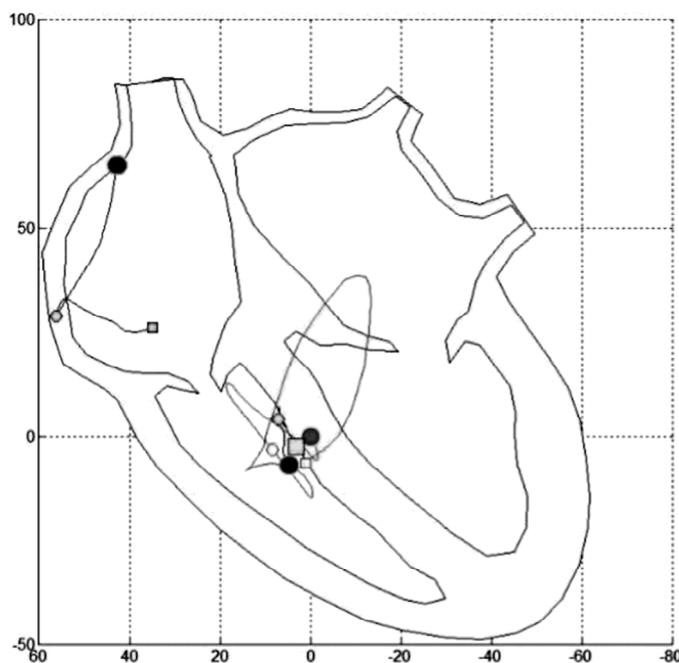


Рис. 3. Треки движения ЭЭГС ДТ во фронтальной плоскости для обследуемого с ИБС

Выводы и заключение

Представленные алгоритмы ориентированы на анализ динамики электрической активности сердца путем пространственно-временного картирования эквивалентных электрических источников сердца. Автором предложено синэргетическое объединение двух подходов к описанию электрической активности сердца: 1) эквивалентный электрический генератор поверхностного типа (ЭЭГС ПТ), характеризующий электрические процессы на поверхности сердца и описываемый пространственно-временными картами электрического потенциала на поверхности эпикарда; 2) эквивалентный электрический генератор дипольного типа (ЭЭГС ДТ), интегрально характеризующий электрические процессы в объеме сердца и описываемый пространственно-временными характеристиками – треками движения ЭЭГС и динамикой изменения модуля и направления вектора дипольного момента. Если подход с использованием

ЭЭГС ПТ ориентирован на диагностику нарушения процессов проводимости, то подход с ЭЭГС дипольного типа ориентирован на диагностику ишемии.

Библиографический список

1. Inverse problem of Electrocardiography / P. W. Macfarlane, A. van Oosterom, O. Pahlm, P. Kligfield, M. Janse, J. Camm // *Comprehensive Electrocardiology*. – 2th ed. – Springer-Verlag London Limited, 2011. – P. 1130–1280.
2. *Мурашко, В. В.* Электрокардиография / В. В. Мурашко, А. В. Струтынский. – Москва : МедПресс, 2019. – 360 с.
3. *Титомир, Л. И.* Неинвазивная электрокардиотопография / Л. И. Титомир, В. Г. Трунов, Э. А. И. Айду. – Москва : Наука, 2003. – 198 с.
4. *Potyagaylo, D.* Binary optimization for source localization in the inverse problem of ECG / D. Potyagaylo, E. G. Cortes, W. H. W. Schulze, O. Dössel // *Medical & Biological Engineering & Computing*. – 2014. – Vol. 52. – P. 717–728.
5. Verification of a new technique for non-invasive electrophysiological examination of the heart, based on solving the inverse problem of electrocardiography / A. Sh. Revishvili, V. V. Kalinin, O. S. Lyadzhina, et al // *Herald of arrhythmology*. – 2008. – Vol. 51. – P. 1–13.
6. Патент РФ 2651068. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Жихарева Г. В., Крамм М. Н., Палютин Ю. А., Стрелков Н. И., Черников А. И. – 2018.
7. 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 // 6th International work-conference (IWBBIO 2018, Granada, Spain, April 25–27) : proceedings. – Granada, Spain, 2018. – Part I.
8. *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 (33). – С. 61–68.
9. *Титомир, Л. И.* Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца / Л. И. Титомир, П. Кнеппо. – Москва : Наука ; Физматлит, 1999. – 447 с.
10. *Баскаков, С. И.* Электродинамика и распространение радиоволн / С. И. Баскаков. – Москва : ЛИБРОКОМ, 2012. – 416 с.
11. *Бреббия, К.* Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. – Москва : Мир, 1987. – 524 с.
12. *Ланцош, К.* Практические методы прикладного анализа / К. Ланцош. – Москва : ГИФМЛ, 1961. – 524 с.
13. *Тихонов, А. Н.* Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – Москва : Наука, 1979. – 285 с.
14. *Крамм, М. Н.* Регуляризация способа реконструкции эквивалентного электрического генератора сердца / М. Н. Крамм // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2018. – № 3 (25). – С. 86–92.

References

1. Macfarlane P. W., van Oosterom A., Pahlm O., Kligfield P., Janse M., Camm J. *Comprehensive Electrocardiology*. 2th ed. Springer-Verlag London Limited, 2011, pp. 1130–1280.
2. Murashko V. V., Strutyanskiy A. V. *Elektrokardiografiya* [Electrocardiography]. Moscow: MedPress, 2019, 360 p. [In Russian]
3. Titomir L. I., Trunov V. G., Aydu E. A. I. *Neinvazivnaya elektrokardiotopografiya* [Non-invasive electrocardiography]. Moscow: Nauka, 2003, 198 p. [In Russian]
4. Potyagaylo D., Cortes E. G., Schulze W. H. W., Dössel O. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2014, vol. 52, pp. 717–728.
5. Revishvili A. Sh., Kalinin V. V., Lyadzhina O. S. et al. *Herald of arrhythmology*. 2008, vol. 51, pp. 1–13.
6. Patent RF 2651068. *Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa* [Patent RF 2651068. Method for 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. 2018. [In Russian]
7. Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Bodin O. N., Seepold R., Chernikov A. I., Kupriyanova Y. A., Zhuravleva N. A. *6th International work-conference (IWBBIO 2018, Granada, Spain, April 25–27): proceedings*. Granada, Spain, 2018, part I.
8. Kramm M. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 3 (33), pp. 61–68. [In Russian]

9. Titomir L. I., Кнеппо P. *Matematicheskoe modelirovanie bioelektricheskogo generatora serdtsa* [Mathematical modeling of a bioelectric heart generator]. Moscow: Nauka; Fizmatlit, 1999, 447 p. [In Russian]
10. Baskakov S. I. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and radio wave propagation]. Moscow: LIBROKOM, 2012, 416 p. [In Russian]
11. Brebbiya K., Telles Zh., Vroubel L. *Metody granichnykh elementov* [Boundary element methods]. Moscow: Mir, 1987, 524 p. [In Russian]
12. Lantsosh K. *Prakticheskie metody prikladnogo analiza* [Practical methods of applied analysis]. Moscow: GIFML, 1961, 524 p. [In Russian]
13. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow: Nauka, 1979, 285 p. [In Russian]
14. Kramm M. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 3 (25), pp. 86–92. [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 Nikolayevich

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. Эквивалентный электрический генератор сердца для неинвазивной электрокардиографии / М. Н. Крамм // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 65–71. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-8.

В. М. Еськов, В. В. Григоренко, Н. Б. Назина

СИСТЕМЫ ТРЕТЬЕГО ТИПА В МЕДИЦИНСКОЙ КИБЕРНЕТИКЕ И БИОМЕХАНИКЕ В ЦЕЛОМ

V. M. Es'kov, V. V. Grigorenko, N. B. Nazina

MEDICAL CYBERNETICS AND BIOMECHANICS: THIRD TYPE SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Более 70 лет назад W. Weaver предложил общую классификацию систем в виде трех типов. В этой классификации системы третьего типа (живые системы) занимали особое место. Математический аппарат для их описания за эти 70 лет так и не был создан. Предлагаются особые свойства таких систем (в виде пяти принципов их организации) и формализованная теория (теория хаоса-самоорганизации), которая дает четкое различие между системами третьего типа и детерминистско-стохастическими системами. Последние активно изучаются сейчас в рамках функционального анализа (детерминизма) и стохастики, что, в действительности, не корректно. Объектом исследования являются системы третьего типа как сложные динамические биомедицинские системы. Предметом исследования являются методы детерминистско-стохастического подхода, а также методы теории хаоса-самоорганизации. Цель работы заключается в демонстрации существенных отличий между системами третьего типа и детерминистско-стохастическими системами. **Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи в работе используются методы детерминистско-стохастического подхода, а также методы теории хаоса-самоорганизации. **Результаты.** Представлены новые инварианты и математические модели таких стохастически нестабильных систем в рамках новой теории хаоса-самоорганизации. Вводится понятие псевдоаттракторов и дается понятие эволюции таких систем третьего типа. **Выводы.** В связи с доказательством эффекта Еськова – Зинченко возникает глобальная неопределенность в измерении, управлении и контроле за параметрами биосистем в медицинской и биологической кибернетике с позиций функционального анализа и стохастики. Необходим переход к новой теории хаоса и самоорганизации, в которой модели систем третьего типа будут базироваться на квазиаттракторах Еськова (их параметрах и координатах центров).

A b s t r a c t. Background. More than 70 years ago, W. Weaver proposed a General classification of systems in the form of three types. In this classification, systems of the third type (living systems) occupied a special place. The mathematical apparatus for describing them has not been created for these 70 years. Special properties of such systems are proposed (in the form of 5 principles of their organization) and a formalized theory (the theory of chaos-self-organization), which gives a clear distinction between systems of the third type and deterministic-stochastic systems. The latter are now being actively studied in the framework of functional analysis (determinism) and stochastics, which, in fact, is not correct. The object of the study is the third type of system, as complex dynamic biomedical systems. The subject of the research is the methods of the deterministic-stochastic approach, as well as the methods of the chaos theory-self-organization. The purpose of the work is to demonstrate the significant differences between the third type of systems and the deterministic-stochastic systems. The object of the

study is the third type of system, as complex dynamic biomedical systems. The subject of the research is the methods of the deterministic-stochastic approach, as well as the methods of the chaos theory-self-organization. The purpose of the work is to demonstrate the significant differences between the third type of systems and the deterministic-stochastic systems. **Materials and methods.** To solve this problem, we use methods of deterministic-stochastic approach, as well as methods of chaos theory-self-organization. **Results.** New invariants and mathematical models of such stochastically unstable systems are presented in the framework of the new theory of chaos-self-organization. The concept of pseudoattractors is introduced and the concept of evolution of such systems of the third type is given. **Conclusions.** In connection with the proof of the Eskov – Zinchenko effect, there is a global uncertainty in the measurement, management and control of biosystem parameters in medical and biological Cybernetics from the standpoint of functional analysis and stochastics. We need to move to a new theory of chaos and self-organization, in which models of systems of the third type will be based on Eskov quasi-tractors (their parameters and coordinates of centers).

К л ю ч е в ы е с л о в а: хаос, стохастика, эффект Еськова – Зинченко, статика, кинематика.

К e y w o r d s: chaos, stochastics, Eskov – Zinchenko effect, statics, kinematics.

Введение

В 1948 г. впервые в истории науки W. Weaver вводит понятия о системах трех типов в природе [1]. Фактически, системы первого типа (Simplicity) – это детерминистские системы, которые описываются в рамках функционального анализа; системы второго типа (nonorganised complexity) – это системы стохастические. Особые системы третьего типа (СТТ) – живые системы (organized complexity), для которых W. Weaver не предложил никаких моделей, до настоящего времени так и не описаны [2]. СТТ в его представлениях – это система с самоорганизацией, но никаких особых свойств и особых моделей для этих систем в современной науке до настоящего времени не установлено [3].

Следуя этой логике развития науки (от детерминизма к стохастике и далее к самоорганизации), мы должны были за эти 70 лет создать новый математический аппарат, новые модели и теорию для описания особых СТТ. Однако до настоящего времени мы даже особенности СТТ не выяснили. Ввели только термин «сложность» в науку, но само это понятие не расшифровано и не изучено, нет четкого определения сложности. Более того, в современной детерминистско-стохастической науке понятие «сложность» ассоциирует с понятием динамического хаоса Лоренца. Однако эта ассоциация не совсем корректна [4, 5], так как живые системы не демонстрируют детерминированный хаос [6, 7].

Раскрытие сложности СТТ и создание нового математического аппарата для описания сложности должно совершаться в рамках построения новой теории хаоса – самоорганизации (ТХС) [8–11]. Именно в ТХС мы доказываем эффект Еськова – Зинченко (ЭЕЗ) и эффект Еськова – Филатовой (ЭЕФ). Оба этих эффекта выводят СТТ за пределы детерминистской и стохастической науки (ДСН) и требуют введения новых понятий статистики и кинематики, неопределенностей 1-го и 2-го рода, создания нового (особого) аппарата для описания этих особых, новых систем [2–9, 12]. Все это приведет в итоге к переходу в новое информационное пространство, в котором (в рамках ТХС) и будет решена общая задача системного синтеза, т.е. нахождения русел и джокеров. Подчеркнем, что в современной математике эта задача в общем виде не имеет решения (нет теории для отыскания параметров порядка, русел и джокеров, тем более для СТТ).

Системы третьего типа и ДСН

Более 70 лет назад наука пребывает в неопределенности относительно систем третьего типа по классификации W. Weaver [1]. Очевидно, что детерминистские системы (описываемые функциональным анализом) строго определены. Для них есть задача Коши (задание

начального состояния системы $x(t_0)$ и уравнений определяет любое состояние системы $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)$. В детерминизме точно определяется начальное состояние $x(t_0)$, есть полная определенность в движении вектора $x(t)$ в фазовом пространстве состояний (ФПС) и в его конечном состоянии ($x(t_k)$). В этом m -мерном ФПС мы все знаем и можем описывать движение $x(t)$ некоторыми уравнениями для вектора $x(t)$.

Более 200 лет назад появилась теория вероятностей и вся стохастика, в которой мы точно должны повторить начальное состояние системы $x(t_0)$, но конечное состояние системы $x(t_k)$ задается множеством точек (требуется повторение опытов). В итоге мы получаем статистические функции $f(x)$, спектральные плотности сигнала (СПС), автокорреляции и другие статистические характеристики. Все это ($f(x)$, СПС, $A(t)$ и т.д.) находится в конце процесса (после повторений), но попасть в данную точку ФПС $x(t_k)$ мы не можем точно никогда (для непрерывных случайных величин попасть в точку невозможно при повторении эксперимента). Вероятность такого попадания для непрерывной случайной величины (НСВ) в стохастике будет нулевой.

Анализируя начальные $x(t_0)$ и конечные $x(t_k)$ состояния системы, мы можем говорить о ее неизменности (для $x(t_k)$), если $f(x)$ подобны при многих повторениях процесса. Если при повторах выборки будут относиться к одной генеральной совокупности, то мы говорим о состоянии покоя системы или об изменениях системы (если меняется ее функция, распределения $f(x)$ и т.д.). Все эти критерии работают точно для систем 1-го и 2-го типов (по классификации W. Weaver). Системы третьего типа [2–11, 13–17] демонстрируют неустойчивость (отсутствие повторения) в рамках детерминизма и стохастики. Это означает, что ни начальные значения $x(t_0)$, ни конечные значения $x(t_k)$, ни выборки $x(t_k)$ в условиях многих повторений мы не можем произвольно повторить [9–17].

Это было точно доказано первоначально 20 лет назад на примере тремора и проверки гипотезы Н. А. Бернштейна о «повторении без повторений» (за год до выхода публикации W. Weaver Бернштейн попытался дать определение СТТ – это система без повторений). Но Бернштейн не доказал главные свойства СТТ. Это было доказано в эффекте Еськова – Зинченко (ЭЕЗ) в виде открытия статистической неустойчивости выборок треморограмм (ТМГ) и теппинграмм (ТПГ). Как произвольные (ТПГ), так и произвольные (ТМГ) движения не могут быть повторены в рамках стохастики [8–17].

Открытие ЭЕЗ в биомеханике и его распространение на различные другие регуляторные системы (в итоге и на гомеостаз в целом) завершает дальнейшее применение стохастики в изучении живых систем (СТТ). ЭЕЗ открыл истинную сложность СТТ, что уводит их из области динамического хаоса Лоренца, в котором мы имеем инвариативность мер (равномерное распределение) в аттракторах Лоренца. Эти аттракторы Лоренца прогнозируются и повторяются. Для СТТ-complexity мы этого не можем получить [2–9].

Наблюдается непрерывный калейдоскоп (разных) статистических функции $f(x)$, СПС, $A(t)$ для основных параметров нервно-мышечной системы (НМС), сердечно-сосудистой системы (ССС), нейросетей мозга (НСМ) и многих других параметров $x_i(t)$ организма любого человека на планете Земля. Повторять два раза подряд одну и ту же выборку (чтобы эти две соседние выборки имели одну, общую генеральную совокупность) – задача крайне сложная для любой биосистемы.

В биомеханике две соседние выборки совпадают с вероятностью $P_2 \leq 0,02$ (и меньше). Три выборки совпадают уже с вероятностью $P_3 \leq 10^{-5}$. Иными словами, это очень редкие события и их невозможно описывать в рамках ДСН, т.е. функциональный анализ и стохастика для СТТ (живых систем) будет иметь исторический характер [14–17]. Точно процесс СТТ не повторить [2–9]. И это начинается с начального условия $x(t_0)$, т.е. нет задачи Коши и нет возможности повторить даже выборку $x(t_0)$ два раза подряд. Об этом говорили древние греки (нельзя в реку войти два раза одинаково), но их за эти 2000 лет никто серьезно не воспринимал. Все ученые мира за последние 200–300 лет изучали живые системы, организмы, ретроспективно (по уже происходящему процессу). Повторить новый процесс СТТ, даже в рамках

стохастики, невозможно. Для иллюстрации этого тезиса представим две характерные таблицы (из таких сотен и тысяч им подобным). В табл.1 мы показываем матрицу парных сравнений выборок ТМГ, которые были получены от одного и того же испытуемого при 15 повторах регистрации ТМГ (по 5 с для каждой выборки). Очевидно, что число k пар ТМГ, которые имеют общую генеральную совокупность, мало ($k_1 = 3$).

Таблица 1

Матрица парного сравнения треморограмм испытуемого АНШ
(без нагрузки, число повторов $n = 15$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,51	0,00	0,00	0,01	0,70
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51		0,00	0,00	0,00	1,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	1,00	0,00	0,00	0,00	

Примечание. Использовался критерий Вилкоксона (значимость $p < 0,05$, число совпадений $k_1 = 3$).

В табл. 2 мы демонстрируем таблицу парных уравнений выборок КИ, которые регистрировались не более 5 мин (по 300 КИ в каждой выборке) для одного и того же испытуемого. В итоге число k_2 статистически совпадающих пар тоже не велико ($k_2 = 10$), что доказывает ЭЗЗ; для ЕСС. Нет статистической устойчивости для подряд полученных выборок как у одного человека (см. табл. 1 и 2), так и у группы испытуемых. Было несколько сотен построенных матриц вида табл. 2 для группы из 15 испытуемых, где $k_3 < 15$.

Таблица 2

Матрица парного сравнения кардиоинтервалов испытуемого ВОА
(без нагрузки, число повторов $n = 15$),

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,40	0,00	0,60	0,00
3	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00		0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,05	0,08	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,19	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,32	0,00	0,35	0,00
12	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32		0,00	0,84	0,00
13	0,00	0,00	0,72	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
14	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,84	0,00		0,00
15		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Примечание. Использовался критерий Вилкоксона (значимость $p < 0,05$, число совпадений $k_2 = 10$).

В живой природе выборки не повторяемы (и они не однородны), а это означает, что любая выборка параметров системы имеет исторический (ретроспективный) характер. Происходят «повторения без повторений», как и предполагал Н. А. Бернштейн в 1947 г. Тогда какие инварианты надо искать для стационарных режимов СТТ (и что такое стационарный режим для СТТ). Наши модели дают инварианты для k , которые различаются между одним физиологическим состоянием СТТ и другим (истинно другим, не в рамках стохастики!) [14–17].

Можно ли вообще различать покой и движения для СТТ? Сейчас разрабатывается новая теория хаоса – самоорганизации (ТХС), в которой вводится понятие квазиаттрактора Еськова (КАЕ) и вводится понятие неопределенностей 1-го и 2-го типов [2–9]. Понятие неопределенности 2-го типа имеет аналогию с принципом неопределенности Гейзенберга [1–5] и активно используется в ТХС. Понятие КАЕ базируется на понятии определяемых границ для движения вектора состояния биосистем $x(t)$ в ФПС [2–9].

Например, в биомеханике мы можем рассчитать вариационные размахи для координаты $x_1(t)$, т.е. положения конечности в пространстве, и для скорости $x_2 = dx_1/dt$. В таком двумерном ФПС любая треморограмма имеет фазовый портрет, который ограничен прямоугольником с площадью $S = \Delta x \cdot \Delta x$.

На тысячах примеров для ТМГ и ТПГ мы показали, что S для КАЕ является инвариантом для данного испытуемого, находящегося в данных условиях. При изменении физиологических условий изменяется величина S и координаты центра КАЕ в ФПС. В ТХС можно количественно рассматривать S и координаты x_i^c центра КАЕ для ТМГ, ТПГ, электромиограмм (ЭМГ), электронейрограмм (ЭНГ), электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и многих других параметров x_i вектора состояния СТТ-complexity. В неизменном состоянии организма это будут инварианты, мы наблюдаем эволюцию СП в ФПС, если эти S и x_i^c изменяются.

Измерение параметров СТТ в ТХС

Учитывая ЭЕЗ и необходимость выборок СТТ, возникает закономерный вопрос о возможности измерения стационарных состояний биосистемы или их изменении. Поэтому при измерении и мониторинге СТТ мы работаем с различными выборками $x(t)$ (необходимость выбора состояния биосистемы $x(t) = (x_1, x_2 \dots x_m)$ в ФПС). В ТХС разработаны методы измерений состояния покоя и истинного движения $x(t)$ системы [2–9]. Покой СТТ характеризуется хаосом выборок x_i (изменяющихся $f(x)$, СПС, $A(t)$ и т.д.), но при этом мы регистрируем статистическую устойчивость параметров КАЕ и координат центров КАЕ (x_i^c) [12–16].

Это означает, что, например, при 15 повторных регистрациях выборок ТМГ или КИ мы получаем выборки S для КАЕ и координаты центров x_i^c . Далее мы еще повторяем 14 серий таких выборок (по 15 выборок с каждой серии), и все полученные выборки S и x_i^c должны статистически (между собой для всех 15 серий) существенно не различаться. Фактически выборки S и x_i^c являются инвариантами для данного стационарного состояния человека или целой группы обследуемых [13–17].

Состояния истинного покоя для $x(t)$ мы оцениваем по статистической устойчивости выборок S для КАЕ и x_i^c . Как тогда находить истинное движение $x(t)$ в ФПС, если его «мерцание» хаотично? Оказалось, что движение x_i^c в пределах исходного КАЕ является фактически покоем. При этом внутри этого КАЕ статические функции, СПС и $A(t)$ непрерывно и хаотически изменяются, а параметры S и x_i^c статистически не изменяются. Как тогда описывать кинематику СТТ-complexity? В ТХС предложены математические инструменты для этого. Разработаны критерии, которые основаны на движении КАЕ в ФПС. В ТХС наблюдается: площадь нового КАЕ² (в случае существенного изменения СТТ) изменяется в 2 раза. Если $S_2 \geq 2S_1$, или $S_2 \leq 0,5 S_1$, то СТТ испытывает существенные изменения. Считается, что СТТ участвует в эволюционных изменениях, это является сигналом для начала заболевания (или выздоровления), появления эффекта действия других факторов на СТТ или нескольких этих факторов [16]. Такие изменения характеризуют эволюцию СТТ-complexity в ФПС и они отличаются от непрерывного хаоса СПС, $f(x)$, $A(t)$. Все эти характеристики и величины при этом могут даже не изменяться существенно или хаотически изменяться (в пределах КАЕ).

Во многих случаях (особенно в медицине, при болезни пациента и последующем его выздоровлении) площади КАЕ могут и не изменяться, но при этом сам квазиаттрактор движется в ФПС. Эти движения оцениваются как движение центра x_i^c в ФПС. Для таких движений предложена процедура расчета скорости движения U_d и ускорения a_d . В целом, мы в этих случаях говорим о полноценной кинематике КАЕ в ФПС [1–6]. Тогда реальное движение КАЕ может характеризовать развитие процесса заболевания (или выздоровления), что является важной характеристикой в медицине.

Напомним, что в современной теории хаоса движение измеряется параметром $f(x)$, СПС и $A(t)$, что затрудняет различия между истинным изменением функций организма (рассматривается в ТХС) и движением вектора $x(t)$ в ФПС (в пределах КАЕ). Статистика, как мы это делаем с ТХС, дает мгновенные состояния организма, как мы это доказали в ТХС по хаосу выборок x_i .

В ТХС мы оперируем с понятием эволюции СТТ, когда КАЕ просто изменяются по размерам или движутся в ФПС. Эволюция для СТТ является важной характеристикой при мониторинге СТТ и измерении параметров $x(t)$ биосистемы [1–9]. В рамках ДСН мы уже не можем объективно оценивать покой (не изменчивость) параметров x биосистемы. Все изменения СТТ можно наблюдать с применением статистики и кинематики (изменения) СТТ-complexity в рамках ТХС. Возникает особая сложность в измерениях, управлении и контроле параметров реальных биосистем (СТТ).

Заключение и выводы

В связи с доказательством ЭЕЗ возникает глобальная неопределенность в измерении, управлении и контроле за параметрами биосистем в медицинской и биологической кибернетике с позиций функционального анализа и стохастики.

При непрерывном и хаотическом изменении статических функций распределения $f(x)$, СПС, $A(x)$ и других характеристик СТТ сама биосистема находится в покое, нет физиологических изменений гомеостаза и функциональных систем, которые этот гомеостаз обеспечивают.

Возникают неопределенности 1-го и 2-го типов [2–17], которые ДСН не может преодолеть в принципе. Необходим переход к новой теории хаоса и самоорганизации, в которой модели СТТ будут базироваться на квазиаттракторах Еськова (их параметрах и координатах центров). В статике эти S (или V) и x_i^c не будут изменяться существенно. Их выборки принадлежат одной генеральной совокупности, т.е. статистически они не изменяются и могут служить индикаторами покоя СТТ при измерении, мониторинге параметров x_i (вектора состояния биосистемы $x(t)$). При существенных изменениях биосистемы мы можем зарегистрировать двумерные изменения площади S для КАЕ (число V) или наблюдать движение КАЕ в ФПС. Это движение КАЕ в ФПС обозначается как эволюция и для нее можно рассчитать скорость U_d и ускорения a_d .

Исследования проводятся в рамках прикладных научных исследований при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по теме: «Математическое моделирование процесса принятия решений сложных динамических систем» (уникальный идентификатор проекта № 18-07-00175 А).

Библиографический список

1. *Eskov, V. M. Uncertainty in the quantum mechanics and biophysics of complex systems / V. M. Eskov, V. V. Eskov, T. V. Gavrilenko, M. I. Zimin // Moscow university physics bulletin. – 2014. – Vol. 69 (5). – P. 406–411. – DOI 10.3103/S002713491405004X.*
2. *Eskov, V. M. Measurement of the dynamic parameters of microchaos in the behavior of living biosystems / V. M. Eskov, T. V. Gavrilenko, V. V. Kozlova, M. A. Filatov // Measurement techniques. – 2012. – Vol. 55 (9). – P. 1096–1101. – DOI 10.1007/S11018-012-0082-0.*
3. *Betelin, V. B. Stochastic volatility in the dynamics of complex homeostatic systems / V. B. Betelin, V. M. Eskov, V. A. Galkin, T. V. Gavrilenko // Doklady Mathematics. – 2017. – Vol. 95 (1). – P. 92–94. DOI 10.1134/S1064562417010240.*
4. *Eskov, V. M. Characteristic features of measurements and modeling for biosystems in phase spaces of states / V. M. Eskov, V. V. Eskov, O. E. Filatova // Measurement techniques. – 2011. – Vol. 53 (12). – P. 1404–1410. – DOI 10.1007/S11018-011-9673-4.*

5. *Eskov, V. M.* Computer technologies in stability measurements on stationary states in dynamic biological systems / V. M. Eskov, S. V. Kulaev, Yu. M. Popov, O. E. Filatova // *Measurement techniques*. – 2006. – Vol. 49 (1). – P. 59–65. – DOI 10.1007/S11018-006-0063-2.
6. Measurement of chaotic dynamics for two types of tapping as voluntary movements / V. M. Eskov, T. V. Gavrilenko, Y. V. Vokhmina, M. I. Zimin, M. A. Filatov // *Measurement techniques*. – 2014. – Vol. 57 (6). – P. 720–724. – DOI 10.1007/S11018-014-0525-X.
7. *Eskov, V. V.* Phenomenon of statistical instability of the third type systems – complexity / V. V. Eskov, T. V. Gavrilenko, V. M. Eskov, Y. V. Vokhmina // *Technical physics*. – 2017. – Vol. 62 (11). – P. 1611–1616. – DOI 10.1134/S106378421711007X.
8. *Zilov, V. G.* Experimental Verification of the Bernstein Effect «Repetition without Repetition» / V. G. Zilov, V. M. Eskov, A. A. Khadartsev, V. V. Eskov // *Bulletin of experimental biology and medicine*. – 2017. – Vol. 163 (1). – DOI 10.1007/S10517-017-3723-0.
9. *Eskov, V. M.* The evolution of the chaotic dynamics of collective modes as a method for the behavioral description of living systems / V. M. Eskov, V. V. Eskov, J. V. Vochmina, T. V. Gavrilenko // *Moscow university physics bulletin*. – 2016. – Vol. 71 (2). – P. 143–154. – DOI 10.3103/S0027134916020053.
10. *Eskov, V. M.* Determination of the degree of synergism of the human cardiorespiratory system under conditions of physical effort / V. M. Eskov, V. V. Eskov, M. Ya. Braginskii, A. S. Pashnin // *Measurement techniques*. – 2011. – Vol. 54 (7). – P. 832–837. – DOI 10.1007/S11018-011-9812-Y.
11. *Eskov, V. M.* Measuring biomechanical parameters of human extremity tremor / V. M. Eskov, V. A. Papshev, V. V. Eskov, D. A. Zharkov // *Measurement techniques*. – 2003. – Vol. 46 (1). – P. 93–99. – DOI 10.1023/A:1023482026679.
12. *Grigorenko, V.* Process Automation of Statistical Uncontrollability Prediction for Parameters of Dynamic Biomedical Systems / V. Grigorenko, V. Mikshina, N. Nazina // *Proceedings International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – Sochi, 2018. – P. 874–878.
13. *Eskov, V. M.* Models of hierarchical respiratory neuron networks / V. M. Eskov // *Neurocomputing*. – 1996. – Vol. 11 (2-4). – P. 203–226. – DOI 10.1016/0925-2312(95)00048-8.
14. *Eskov, V. M.* Computer identification of compartmental neuron circuits / V. M. Eskov, O. E. Filatova, V. P. Ivashenko // *Measurement techniques*. – 1994. – Vol. 37 (8). – P. 967–971. – DOI 10.1007/BF00977157.
15. *Zilov, V. G.* Experimental Study of Statistical Stability of Cardiointerval Samples / V. G. Zilov, A. A. Khadartsev, V. V. Eskov, V. M. Eskov // *Bulletin of experimental biology and medicine*. – 2017. – Vol. 164 (2). – P. 115–117. – DOI 10.1007/S10517-017-3937-1.
16. Shannon entropy in the research on stationary regimes and the evolution of complexity / V. M. Eskov, V. V. Eskov, Y. V. Vochmina, D. V. Gorbunov, L. K. Ilyashenko // *Moscow University Physics Bulletin*. – 2017. – Vol. 72 (3). – P. 309–317. – DOI 10.3103/S0027134917030067.
17. *Vokhmina, Y. V.* Measuring order parameters based on neural network technologies / Y. V. Vokhmina, V. M. Eskov, T. V. Gavrilenko, O. E. Filatova // *Measurement techniques*. – 2015. – Vol. 58 (4). – P. 462–466. – DOI 10.1007/S11018-015-0735-X.

References

1. Eskov V. M., Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Zimin M. I. *Moscow university physics bulletin*. 2014, vol. 69 (5), pp. 406–411. DOI 10.3103/S002713491405004X.
2. Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Kozlova V. V., Filatov M. A. *Measurement techniques*. 2012, vol. 55 (9), pp. 1096–1101. DOI 10.1007/S11018-012-0082-0.
3. Betelin V. B., Eskov V. M., Galkin V. A., Gavrilenko T. V. *Doklady Mathematics*. 2017, vol. 95 (1), pp. 92–94. DOI 10.1134/S1064562417010240.
4. Eskov V. M., Eskov V. V., Filatova O. E. *Measurement techniques*. 2011, vol. 53 (12), pp. 1404–1410. DOI 10.1007/S11018-011-9673-4.
5. Eskov V. M., Kulaev S. V., Popov Yu. M., Filatova O. E. *Measurement techniques*. 2006, vol. 49 (1), pp. 59–65. DOI 10.1007/S11018-006-0063-2.
6. Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Vokhmina Y. V., Zimin M. I., Filatov M. A. *Measurement techniques*. 2014, vol. 57 (6), pp. 720–724. DOI 10.1007/S11018-014-0525-X.
7. Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Eskov V. M., Vokhmina Y. V. *Technical physics*. 2017, vol. 62 (11), pp. 1611–1616. DOI 10.1134/S106378421711007X.
8. Zilov V. G., Eskov V. M., Khadartsev A. A., Eskov V. V. *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2017, vol. 163 (1). DOI 10.1007/S10517-017-3723-0.
9. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina J. V., Gavrilenko T. V. *Moscow university physics bulletin*. 2016, vol. 71 (2), pp. 143–154. DOI 10.3103/S0027134916020053.
10. Eskov V. M., Eskov V. V., Braginskii M. Ya., Pashnin A. S. *Measurement techniques*. 2011, vol. 54 (7), pp. 832–837. DOI 10.1007/S11018-011-9812-Y.

11. Eskov V. M., Papshev V. A., Eskov V. V., Zharkov D. A. *Measurement techniques*. 2003, vol. 46 (1), pp. 93–99. DOI 10.1023/A:1023482026679.
12. Grigorenko V., Mikshina V., Nazina N. *Proceedings International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, 2018, pp. 874–878.
13. Eskov V. M. *Neurocomputing*. 1996, vol. 11 (2-4), pp. 203–226. DOI 10.1016/0925-2312(95)00048-8.
14. Eskov V. M., Filatova O. E., Ivashenko V. P. *Measurement techniques*. 1994, vol. 37 (8), pp. 967–971. DOI 10.1007/BF00977157.
15. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. V., Eskov V. M. *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2017, vol. 164 (2), pp. 115–117. DOI 10.1007/S10517-017-3937-1.
16. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina Y. V., Gorbunov D. V., Ilyashenko L. K. *Moscow University Physics Bulletin*. 2017, vol. 72 (3), pp. 309–317. DOI 10.3103/S0027134917030067.
17. Vokhmina Y. V., Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Filatova O. E. *Measurement techniques*. 2015, vol. 58 (4), pp. 462–466. DOI 10.1007/S11018-015-0735-X.

Еськов Валерий Матвеевич

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделом биофизики
и нейрокибернетики,
Научно-исследовательский институт
системных исследований
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36)
E-mail: firing.squad@mail.ru

Es'kov Valeriy Matveevich

doctor of physical and mathematical sciences,
professor,
head of department of biophysics
and neurocybernetics,
Research Institute for System Research
of the Russian Academy of Sciences
(36 Nakhimovsky avenue, Moscow, Russia)

Григоренко Виолетта Вячеславовна

старший преподаватель,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: grigv_84@mail.ru

Grigorenko Violetta Viacheslavovna

senior lecturer,
sub-department of computer science
and engineering,
Surgut State University
(1 Lenina street, Surgut, Russia)

Назина Нина Борисовна

доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: nnb60@mail.ru

Nazina Nina Borisovna

associate professor,
sub-department of computer science
and engineering,
Surgut State University
(1 Lenina street, Surgut, Russia)

Образец цитирования:

Еськов, В. М. Системы третьего типа в медицинской кибернетике и биомеханике в целом / В. М. Еськов, В. В. Григоренко, Н. Б. Назина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 72–79. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-9.

ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.382.(06)

DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-10

*П. Г. Михайлов, М. А. Чиркина, В. П. Сазонова, Л. А. Маринина, Л. Базарбай***ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОДОРОДНЫХ
СЕНСОРОВ. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ
ФОРМИРОВАНИЯ***P. G. Mikhailov, M. A. Chirkina, V. P. Sazonova, L. A. Marinina, L. Basarbay***SENSITIVE ELEMENTS OF HYDROGEN SENSORS.
FEATURES OF FORMATION TECHNOLOGIES**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В связи с ростом потребности в чистых технологиях для микро-и нанoeлектроники, которые можно провести только в атмосфере водорода – газа – восстановителя, необходимы средства контроля его применения для предотвращения утечек и взрывов водородных смесей, соответствующие технологии изготовления сенсоров водорода. **Материалы и методы.** Следует отметить, что процессы изготовления чувствительных элементов водородных сенсоров (ЧЭС) являются технологически очень сложными и трудоемкими процессами с недостаточно высоким выходом годных приборов, так как включают в себя несколько технологических платформ: тонкопленочную, твердотельную и микромеханическую. При проведении технологических операций (ТО) по формированию структур ЧЭС используется сложное, дорогостоящее оборудование, включая магнетронные и электронно-лучевые напылительные установки, реакторы для газофазного осаждения поликремния, нитрида кремния и двуокиси кремния, установки ионного легирования, диффузионные печи. **Результаты.** Разработаны и апробированы при изготовлении экспериментальных образцов специальные ТО и ТП формирования водородочувствительных элементов сенсоров.

A b s t r a c t. Background. Due to the growing demand for clean technologies for micro- and nanoelectronics, which can be carried out only in an atmosphere of hydrogen – a gas – reductant, means of control of its use are necessary to prevent leaks and explosions of hydrogen mixtures corresponding technologies for the manufacture of hydrogen sensors. **Materials and methods.** It should be noted that the manufacturing processes of sensitive elements of hydrogen sensors (SEHS) are technologically very complex and time-consuming processes with insufficiently high yield of suitable devices, since they include several technological platforms: thin-film, solid-state and micromechanical. When carrying out technological operations (TO) on the formation of SEHS structures, complex, expensive equipment is used, including magnetron and electron beam spraying devices, reactors for the gas-phase deposition of polysilicon, silicon nitride and silicon dioxide, ion doping plants, diffusion furnaces. **Results** Special TO and TP for the formation of hydrogen-sensitive sensor elements were developed and tested in the manufacture of experimental samples.

© Михайлов П. Г., Чиркина М. А., Сазонова В. П., Маринина Л. А., Базарбай Л., 2020

К л ю ч е в ы е с л о в а: технология, операция, сенсор, элемент, водород напыление, легирование.

К е у w o r d s: technology, operation, sensor, element, hydrogen deposition, alloying.

Введение

Технология изготовления ЧЭВС представляет собой целый комплекс взаимосвязанных технологических процессов (ТП) и технологических операций (ТО), относящихся к различным технологическим платформам [1, 2]: тонкопленочной, твердотельной и микромеханической.

Применительно к транзисторному ЧЭВС [3] по тонкопленочной технологии формируется водородочувствительная пленка палладий-серебро (Pd-Ag) и алюминиевая (Al) контактная металлизация.

По твердотельной технологии формируются элементы полевого транзистора: ионно-легированные области сток-исток, диффузионный нагреватель, элементы планарного датчика температуры [4, 5].

С применением микромеханической технологии формируется профиль затвора и конфигурация всего ЧЭВС на основе МДП – транзистора с подвешенным затвором [6, 7].

Фактически все эти группы технологий состоят из отдельных, как независимых, так и взаимосвязанных ТП и ТО, выстраиваемых в определенной последовательности согласно разработанным маршрутным ТП.

Разработанные в процессе исследований ТП и ТО были использованы для формирования элементов и структур двух типов ЧЭВС: 1) резистивного на изолирующей подложке и на основе полупроводниковых структур; 2) МДП с подвешенным затвором [3, 8].

Рассмотрим особенности технологий изготовления двух типов ЧЭВС.

1. Технология изготовления тонкопленочного резистивного ЧЭВС на изолирующих подложках (рис. 1).

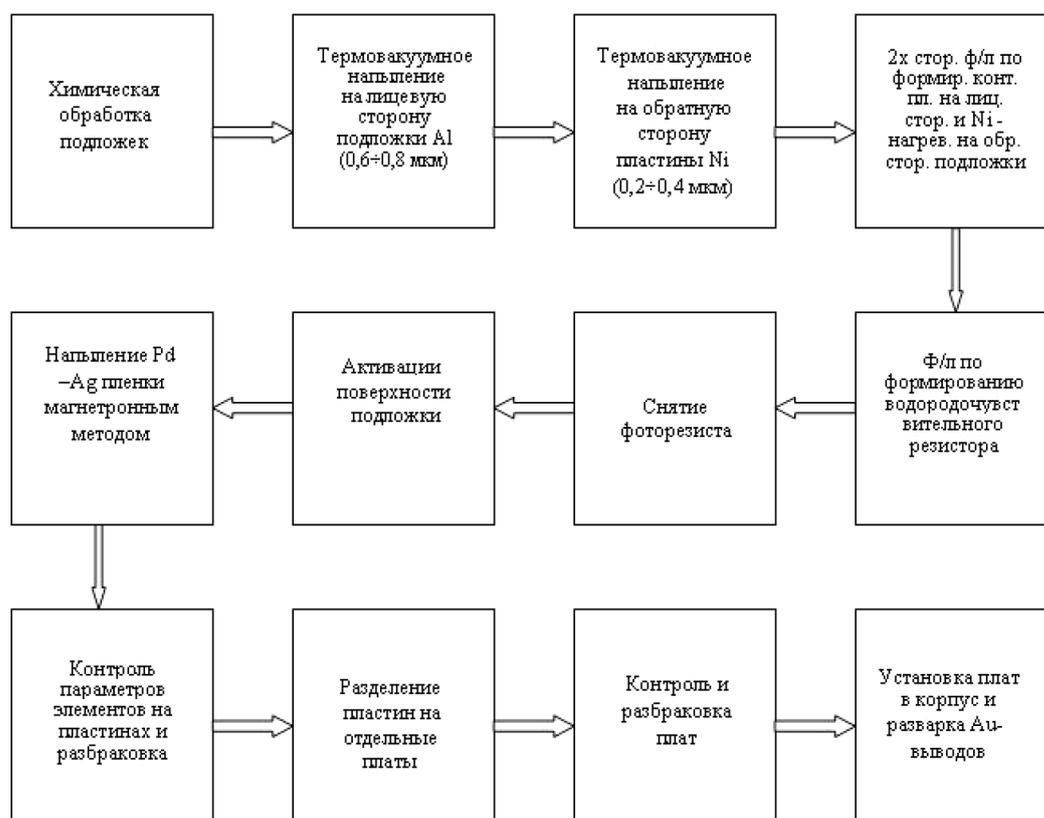


Рис. 1. Укрупненный маршрутный ТП изготовления ЧЭВС на основе тонкопленочного газочувствительного резистора из сплава палладия с серебром

При изготовлении Pd – тонкопленочного ЧЭВС в качестве основы выбирались подложки: монокристаллический сапфир (лейкосапфир), ситалл, поликор и окисленный кремний. Нагревательный элемент на обратной стороне пластины был изготовлен путем жидкостного травления напыленной пленки никеля. В качестве материалов для контактных площадок к палладиевым резисторам, расположенным на лицевой стороне подложки, использовались либо золото с подслоем титана, либо Al [9].

Технологические операции по изготовлению резистивного ЧЭВС на изоляционных подложках проводятся в последовательности, показанной на рис. 1:

- 1) жидкостная очистка диэлектрических подложек (стандартные ТО);
- 2) напыление на лицевую сторону подложки либо золота с подслоем титана, либо Al, а на обратную сторону – пластины никеля. Толщины напыляемых пленок: Au (0,4 мкм), Ti (100...400 Å), Al (0,6...0,8 мкм), Ni (0,2...0,4 мкм). Нанесение всех указанных пленок производилось термическим вакуумным напылением при давлении остаточных газов $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Температура подложки 200...250 °С;
- 3) нанесение фоторезиста на обе стороны подложки (стандартные ТО);
- 4) двухсторонняя ф/л для формирования контактных площадок на лицевой стороне и никелевого нагревателя на обратной стороне подложки;
- 5) жидкостное травление поочередно металлических пленок с лицевой и обратной стороны пластины;
- 6) снятие фоторезиста (стандартные ТО);
- 7) химическая обработка перед напылением палладия;
- 8) напыление палладия через биметаллическую маску;
- 9) резка пластин на кристаллы алмазным диском (стандартные ТО);
- 10) установка кристалла ЧЭВС в корпус измерительного модуля.

Исследовались два метода формирования конфигурации газочувствительного резистора и нагревателя:

- 1) масочный метод;
- 2) взрывная фотолитография.

Напыление Pd в обоих случаях проводилось в установке термического вакуумного напыления при давлении остаточных газов $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. В первом случае подложка нагревалась до температуры порядка 250 °С, во втором случае нагрев свыше 100...130 °С не допускается, так как невозможно произвести снятие негативного фоторезиста и проведение взрывной фотолитографии.

В качестве материала чувствительных резисторов был использован сплав Pd с серебром (25 %). Нанесение сплава Pd-Ag (25 %) проводилось термическим вакуумным напылением на подложки двух типов: сапфир и окисленный кремний. Следует отметить, что при термовакuumном методе в напыленной пленке не обеспечивается стехиометрия исходного сплава из-за разных температур испарения Pd и Ag.

2. Технология изготовления резистивного ЧЭВС на основе полупроводниковых структур (рис. 2).

Последовательность ТО следующая:

- окисление кремниевых пластин КДБ-4 (100) в диффузионной печи типа СДО для создания маски из SiO₂ толщиной 0,1...0,3 мкм;
- 1-я ф/л по вскрытию окон в SiO₂ под область истока и стока МДП-транзистора;
- формирование диффузией фосфора областей n-типа;
- стравливание маскирующего слоя SiO₂ из подзатворной области между стоком и истоком;
- тонкое окисление для создания слоя подзатворного диэлектрика;
- вскрытие окон под контакт с металлизацией в областях истока и стока;
- напыление Al (стандартные ТО);
- ф/л по Al для формирования шин металлизации, контактных площадок и затвора (стандартные ТО);
- формирование пленки SiO₂ толщиной 0,2...0,6 мкм пиролизом моносилана в среде кислорода при 350...450 °С;
- 2-я ф/л по созданию маски из фоторезиста над подзатворной областью и проведение травления пленки SiO₂ в растворе HF;

- используя ту же маску из фоторезиста, травят над подзатворной областью Al в травителе для алюминия ($70 \text{ мл H}_3\text{PO}_4 + 1,5 \text{ мл CH}_3\text{CO-OH} + 5 \text{ мл H}_2\text{O}$), при этом Al предотвращает травление подзатворного окисла при вскрытии окна в защитной пленке;
- удаляют фоторезист и проводят 3-ю ф/л для вскрытия окна в защитной пленке под контакт Pd с алюминием;
- напыляют методом электронно-лучевого распыления Pd толщиной $0,05 \dots 0,3 \text{ мкм}$ и 4 ф/л формируют затвор из Pd, используя в качестве травителя раствор азотной и соляной кислот (1 ч. $\text{HNO}_3 + 3 \text{ ч. HCl}$);
- 5-я ф/л по формированию в защитной пленке окон на контактных площадках.

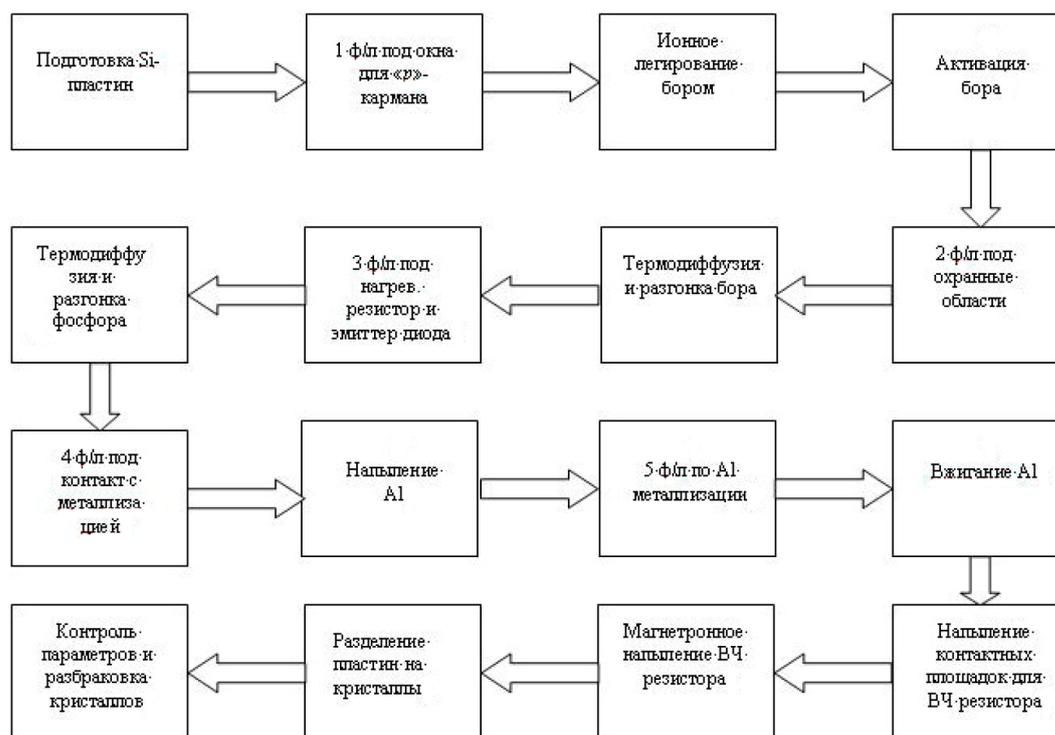


Рис. 2. Укрупненный маршрутный ТП изготовления ЧЭВС на основе МДП – транзистора с подвешенным затвором

Данный способ изготовления ЧЭВС позволяет повысить выход годных структур. Это достигается за счет:

- 1) формирования над областью затвора транзистора временной Al защиты;
- 2) нанесения низкотемпературной пленки SiO_2 , предотвращающей воздействие травителя для Pd на Al металлизацию;
- 3) вскрытия окна под затвор в данной пленке сначала до Al, а затем до подзатворного диэлектрика;
- 4) вскрытия окна в защитной пленке в области контакта Pd с Al и формирования Pd затвора прямой фотолитографией.

При проведении работ по отработке ТП изготовления ЧЭВС для формирования газочувствительных пленок отрабатывались два метода нанесения тонких пленок.

1 метод – термическое испарение в вакууме проволоки из сплава палладия с серебром (PdCr20). Для его реализации использовалась универсальная установка вакуумного напыления типа УВН 71П-3 с резистивным испарителем из молибдена. Из-за значительной разницы в температурах плавления палладия (1828 К) и серебра (1234 К) при расплавлении навески из сплава PdCr20 происходит фракционирование сплава, так как в первую очередь расплавляется и испаряется более легкоплавкая составляющая сплава Ag, а уже потом – более тугоплавкая составляющая Pd. Это подтверждается анализом распределения элементов по толщине тонкой пленки, проведенным с помощью электронной ОЖЕ-спектроскопии, при которой проводился

последний анализ тонкой пленки в процессе ее распыления ионами аргона с энергией 3 кэВ и химический анализ с учетом коэффициентов элементной чувствительности.

Характер распределения элементов Pd и Ag от поверхности пленки к поверхности подложки из кремния (рис. 3) указывает на то, что на поверхности подложки пленка состоит из сплава, содержащего 55 % Pd и 45 % Ag. Ближе к середине толщины пленки содержание Ag доходит до 65 %, а Pd падает до 35 %. Верхний слой пленки состоит из чистого палладия. Такое распределение элементов сплава в пленке приводит к ухудшению адгезии пленки и падению ее чувствительности к водороду.

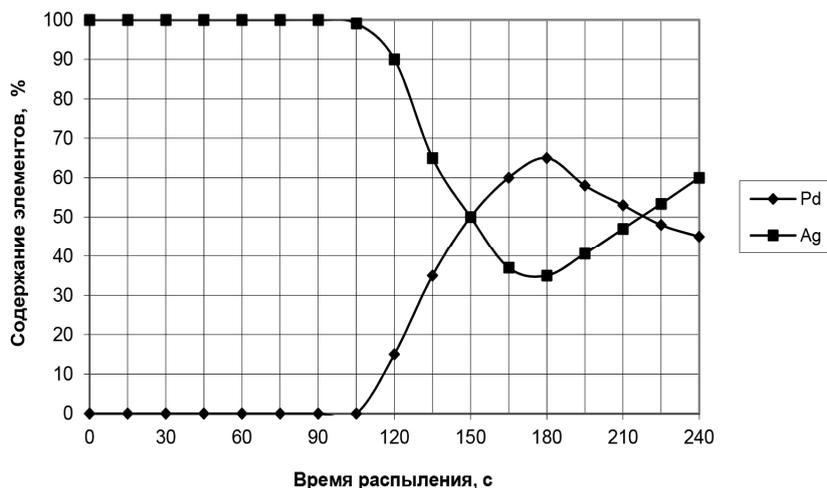


Рис. 3. Распределение элементов по толщине газочувствительной пленки при термовакuumном напылении

2 метод – магнетронное распыление мишени из сплава PdCr20 в плазме аргона с помощью планарного магнетрона. Газочувствительные пленки получали на модернизированной под магнетронное распыление установке типа УВН 71П-3. Толщина формируемых пленок составила 50...60 нм. Полученные пленки исследовались с помощью электронной ОЖЕ-спектрографии на послойный анализ состава тонкой пленки в процессе ее распыления ионами аргона. Характер распределения элементов Pd и Ag от поверхности тонкой пленки к поверхности подложки из кремния (рис. 4) показывает, что состав исходного материала (сплав PdCr20) повторяется в полученной пленке, содержание Pd колеблется в пределах 76...79 %, а содержание Ag в пределах 20...24 %. Полученная данным методом пленка обладает удовлетворительными газочувствительными свойствами.

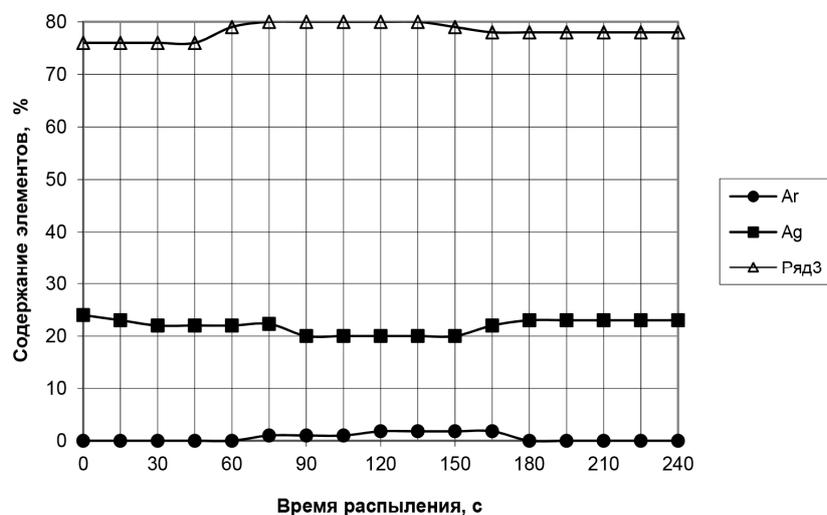


Рис. 4. Распределение элементов по толщине газочувствительной пленки, сформированной магнетронным напылением из мишени PdCr20

Особенности технологии формирования ЧЭВС

Особенностями технологии формирования ЧЭВС, по сравнению с другими полупроводниковыми приборами, в частности с КМОП-транзисторами, состоит в том, что необходимо обеспечить селективность газочувствительной пленки к водороду с одновременной возможностью ее дегазации путем периодического нагрева. При циклическом характере работы пленки она должна не терять своих механических свойств и иметь низкое значение порогового напряжения для обеспечения необходимой чувствительности преобразования.

К таким специальным операциям можно отнести:

– отжиг кремниевых пластин в атмосфере аргона после формирования подзатворного тонкого окисла;

– ионно-плазменное травление Pd-пленки (газовая среда Ar, время травления 100 мин) с использованием маски при из Al, так как скорость травления Pd в несколько раз превышает скорость травления Al;

– после снятия фоторезиста проводилась еще одна ф/л с помощью фотошаблона, используемого для создания окон под тонкий окисел. При этом вскрывались окна в области затвора МДП-транзистора, после чего в травителе для Al вытравливался Al между Pd полосками и под ними. В результате Pd полоски оказываются подвешенными над поверхностью подзатворного диэлектрика на высоте порядка 0,1 мкм;

– далее удалялся фоторезист и проводилось травление Al по всей пластине на толщину тонкого слоя Al (0,1 мкм). Время травления Al на данном этапе должно строго контролироваться, чтобы не была повреждена алюминиевая разводка и контактные площадки, толщина Al в которых составляет 0,8...0,9 мкм.

В процессе отработки технологии было выяснено, что при обычных методах напыления Pd на поверхность SiO_2 получают низкую адгезия Pd пленки, что неприемлемо для датчиков, подвергающихся воздействиям дестабилизирующих факторов, поэтому были исследованы возможные варианты повышения силы сцепления пленки Pd с поверхностью SiO_2 . Была опробована технология активации поверхности путем ее сенсбилизации с использованием раствора двухлористого олова (SnCl_2), в результате чего на поверхности диэлектрика создается пленка из ионов двухвалентного олова, которые впоследствии на этапе активации, являются восстановителями для ионов Pd [10, 11].

Для повышения чувствительности и быстродействия ЧЭВС было применено профилирование кремниевого кристалла с использованием химического травления и формируемого стоп-слоя с повышенной концентрацией носителей заряда [12]. Травление осуществлялось на установке анодного травления (рис. 5).

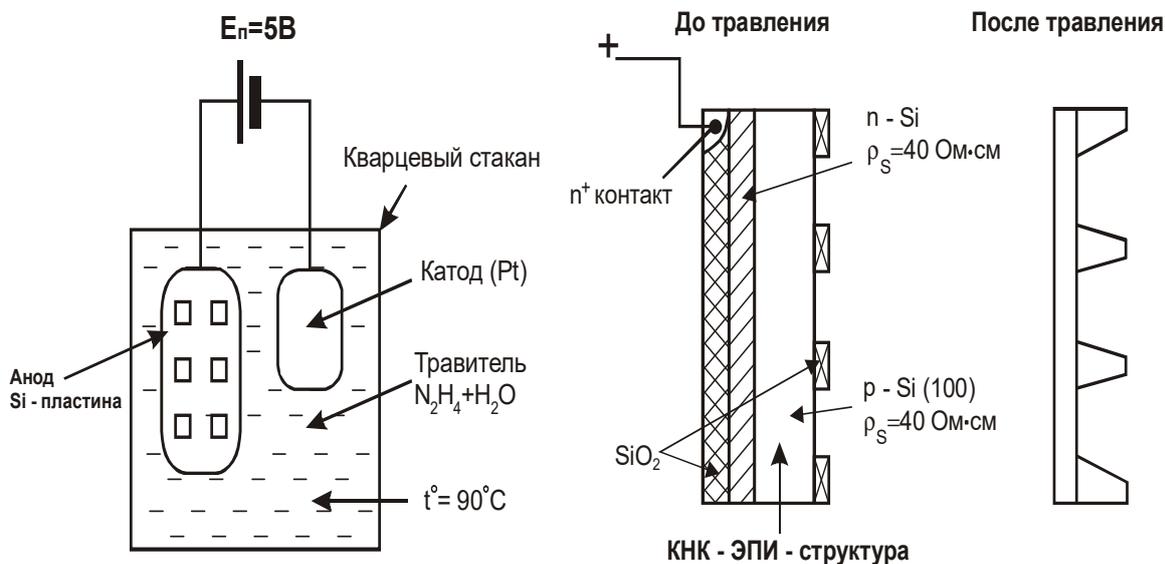


Рис. 5. Технология формирования тонких мембран ЧЭВС МЭД с использованием анодного травления

Как показали исследования и поисковые работы по различным отечественным и иностранным литературным источникам, введение в конструкцию газового датчика различных по избирательности газочувствительных структур, а также сенсоров температуры и влажности позволит создать multifunctional датчики и проводить их диагностику работы, не снимая с объекта контроля [13–15].

При стендовых испытаниях было определено, что разработанный экспериментальный образец полупроводникового интегрального ЧЭВС на основе газочувствительного резистора из сплава палладия с серебром способен работать при концентрациях водорода от 0,1 до 10,0 объемных %. По МДП – ЧЭВС с подвешенным затвором в настоящее время проводятся исследования по стабилизации электрофизических характеристик сенсорных структур.

Заключение

В результате проведения исследований по отработке и внедрению технологий формирования ВЧЭ были получены следующие результаты:

1. Разработаны и оптимизированы ТП и ТО изготовления элементов и структур ЧЭВС в части:

- изготовления резистивного ЧЭВС на изолирующих подложках;
- резистивного ЧЭВС на основе полупроводниковых структур;
- ЧЭВС на основе МДП-транзистора с подвешенным затвором;
- повышения адгезионной активности поверхности окисла кремния;
- формирования пленок из чистого палладия и его сплава с серебром;
- изготовления подвешенного палладиевого затвора;
- формообразования структур ЧЭВС (анизотропного, изотропного и электрохимического травления);
- определены травители, технологические режимы и полупроводниковые структуры, позволяющие получить самотормозящиеся режимы травления.

2. Разработана топология основных элементов ЧЭВС и изготовлен комплект фотошаблонов.

3. Разработанный полупроводниковый интегральный ЧЭВС на основе газочувствительного резистора из сплава палладия с серебром способен работать при концентрациях водорода от 0,1 до 10,0 объемных %.

По МДП – ЧЭВС с подвешенным затвором в настоящее время проводятся исследования по стабилизации электрофизических характеристик сенсорных структур.

Библиографический список

1. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю. А. Чаплыгина. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2015. – Вып. 3. – 480 с.
2. Вавилов, В. Д. Микросистемные датчики физических величин : монография / В. Д. Вавилов, С. П. Тимошенко, А. С. Тимошенко. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 471 с.
3. Патент RU 1785049 СССР. Способ изготовления датчиков водорода на МОП-транзисторах / Л. А. Маринина, С. А. Козин ; МКИ: H01L 21/336 ; опубл. 30.12.90.
4. Айнспрук, Н. Плазменная технология в производстве СБИС / Н. Айнспрук, Д. Браун. – Москва : Мир, 1987. – 471 с.
5. Kumar, A. Fabrication of porous silicon filled Pd/SiC nanocauliflower thin films for high performance H₂ gas sensor / A. Kumar, A. Kumar, R. Chandra // Sens. Actuators B Chem. – 2018. – Vol. 264. – P. 10–19.
6. Integrated Temperature and Hydrogen Sensors with MEMS Technology / H.-C. Jiang, M. Huang, Y.-B. Yu, X.-Y. Tian et. all // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – P. 94.
7. Hübert, T. Hydrogen sensors – A review / T. Hübert, L. Boon-Brett, G. Black, U. Banach // Sensors and Actuators B Chemical. – 2011. – Vol. 157 (2). – P. 329–352.
8. Основы золь-гель-технологии нанокompозитов / А. И. Максимов, В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, О. А. Шилова. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. – 273 с.
9. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы / В. Я. Распопов. – Москва, 2007. – 400 с.
10. Волькенштейн, Ф. Ф. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции / Ф. Ф. Волькенштейн. – Москва : Наука, 1987. – С. 431.

11. Öztürk, S. Pd thin films on flexible substrate for hydrogen sensor / S. Öztürk, N. Kılınc // *J. Alloys Compd.* – 2016. – Vol. 674. – P. 179–184.
12. Михайлов, П. Г. Формообразование сенсорных элементов и структур микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов // *Новые промышленные технологии.* – 2004. – № 2. – С. 67–69.
13. Multi-functional sensors for control systems and monitoring / P. Mikhailov, M. Baktybayev, Z. Bayasilova and all // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET).* – 2018. – Vol. 9, iss. 13. – P. 959–967.
14. Mikhajlov, P. G. Mathematical Modeling of Combined Sensor Information / P. G. Mikhajlov, Yu. N. Slesarev, V. A. Chulkov // *Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research.* – 2016. – Vol. 11, № 20. – P. 10332–10337.
15. 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, Zh. K. Azamatova, B. N. Azamatov // *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE).* – 2016. – Vol. 1. – P. 84–90.

References

1. *Nanotekhnologii v elektronike* [Nanotechnology in electronics]. Ed. by Yu. A. Chaplygin. Moscow: TEKhNOSFERA, 2015, iss. 3, 480 p. [In Russian]
2. Vavilov V. D., Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S. *Mikrosistemnye datchiki fizicheskikh velichin: monografiya* [Microsystem sensors of physical quantities: monograph]. Moscow: TEKhNOSFERA, 2018, 471 p. [In Russian]
3. Patent RU 1785049 SSSR. *Sposob izgotovleniya datchikov vodoroda na MOP-tranzistorakh* [Patent RU 1785049 of the USSR. A method of manufacturing a sensor of hydrogen on MOS devices]. L. A. Marinina, S. A. Kozin; MKI: H01L 21/336; publ. 30.12.90. [In Russian]
4. Aynspruk N., Braun D. *Plazmennaya tekhnologiya v proizvodstve SBIS* [Plasma technology in the production of VLSI]. Moscow: Mir, 1987, 471 p. [In Russian]
5. Kumar A., Chandra R. *Sens. Actuators B Chem.* 2018, vol. 264, pp. 10–19.
6. Jiang H.-C., Huang M., Yu Y.-B., Tian X.-Y. et al. *Sensors.* 2018, vol. 18, p. 94.
7. Hübert T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. *Sensors and Actuators B Chemical.* 2011, vol. 157 (2), pp. 329–352.
8. Maksimov A. I., Moshnikov V. A., Tairov Yu. M., Shilova O. A. *Osnovy zol'-gel'-tekhnologii nanokompozitov* [Fundamentals of sol-gel technology of nanocomposites]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2007, 273 p. [In Russian]
9. Raspopov V. Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* [Micromechanical devices]. Moscow, 2007, 400 p. [In Russian]
10. Vol'kenshteyn F. F. *Elektronnye protsessy na poverkhnosti poluprovodnikov pri khemosorbtsii* [Electronic processes on the surface of semiconductors during chemisorption]. Moscow: Nauka, 1987, p. 431. [In Russian]
11. Öztürk S., Kılınc N. *J. Alloys Compd.* 2016, vol. 674, pp. 179–184.
12. Mikhaylov P. G. *Novye promyshlennye tekhnologii* [New industrial technology]. 2004, no. 2, pp. 67–69. [In Russian]
13. Mikhailov P., Baktybayev M., Bayasilova Z. and all. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET).* 2018, vol. 9, iss. 13, pp. 959–967.
14. Mikhajlov P. G., Slesarev Yu. N., Chulkov V. A. *Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research.* 2016, vol. 11, no. 20, pp. 10332–10337.
15. Ozhikenov K. A., Mikhailov P. G., Ismagulova R. S., Azamatova Zh. K., Azamatov B. N. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE).* 2016, vol. 1, pp. 84–90.

Михайлов Петр Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова/Гагарина 1а/11)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Mikhaylov Petr Grigor'evich

doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

Чиркина Марина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: chm-77@mail.ru

Сазонова Вера Петровна

сотрудница,
Технологический университет
(Россия, Московская обл., г. Королев,
ул. Гагарина, 42)
E-mail: verochka.86@list.ru

Маринина Лариса Александровна

кандидат технических наук, преподаватель,
Пензенский филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Пенза, Военный городок, 1)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Базарбай Лашын

докторантка,
Казахский национальный технический
университет им. К. Сатпаева
(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22)
E-mail: lashyn_7754@mail.ru

Chirkina Marina Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of Information and computer systems,
Penza State University
of Architecture and Construction
(28 Herman Titov street, Penza, Russia)

Sazonova Vera Petrovna

collaborator,
University of Technology
(42 Gagarina street, Korolev, Moscow region, Russia)

Marinina Larisa Aleksandrovna

candidate of technical sciences, lecturer,
Penza branch of Military Academy
Logistics Support named after general
of the army A. V. Khruleva
(1 Voenny gorodok, Penza, Russia)

Bazarbay Lashyn

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

Образец цитирования:

Чувствительные элементы водородных сенсоров. Особенности технологий формирования / П. Г. Михайлов, М. А. Чиркина, В. П. Сазонова, Л. А. Маринина, Л. Базарбай // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 80–88. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-10.

*Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин,
Г. В. Козлов, Т. О. Зинченко, В. В. Смогунов*

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, СИНТЕЗИРУЕМЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

*E. A. Pecherskaya, P. E. Golubkov, O. V. Karpanin,
G. V. Kozlov, T. O. Zinchenko, V. V. Smogunov*

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF COATINGS SYNTHESIZED BY MICROARC OXIDATION

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Микродуговое оксидирование – перспективный метод получения высокопрочных защитных покрытий, обладающих уникальными свойствами на деталях из легких металлов и сплавов. Однако эффективность данного метода ограничена отсутствием единого формализованного описания взаимосвязей между множеством факторов, влияющих на свойства покрытий, и показателями их качества. Это подтверждает актуальность представленного исследования, цель которого заключается в систематизации технологических параметров, моделировании функциональных зависимостей свойств оксидных покрытий от факторов различной природы. **Материалы и методы.** Рассмотрен метод микродугового оксидирования, который используется для получения износостойких, термостойких, электроизоляционных защитных покрытий на деталях из сплавов алюминия, магния, титана. **Результаты.** Впервые предложена модель взаимосвязи технологических параметров процесса микродугового оксидирования и параметров, характеризующих качество синтезируемых покрытий. Данную модель целесообразно использовать для оптимизации технологических режимов с целью синтеза покрытий с заданными свойствами. **Выводы.** Предложен системный подход к описанию процесса микродугового оксидирования, что позволило посредством разработки графовой модели взаимосвязи параметров, влияющих на свойства покрытий, систематизировать и формализовать установленные закономерности, выявить наиболее важные факторы, подлежащие измерению и контролю в процессе МДО-обработки.

A b s t r a c t. Background. Microarc oxidation is a promising method for producing high-strength protective coatings that have unique properties on parts made of light metals and alloys. However, the effectiveness of this method is limited by the lack of a single formalized description of the relationships between many factors affecting the properties of coatings and their quality indicators. This confirms the relevance of the study, the purpose of which is to systematize technological parameters, to model the functional dependences of the properties of oxide coatings on factors of various nature. **Materials and methods.** The article discusses the method of microarc oxidation, which is used to obtain wear-resistant, heat-resistant, electrical insulating protective coatings on parts made of aluminum, magnesium, and titanium alloys. **Results.** For the first time, a model of the relationship between the technological parameters of the microarc oxidation process and the parameters characterizing the quality of the synthesized

coatings is proposed. It is advisable to use this model for optimizing technological conditions in order to synthesize coatings with desired properties. **Conclusions.** A systematic approach to the description of the microarc oxidation process is proposed, which allows, through the development of a graph model of the relationship of parameters affecting the properties of the coatings, to systematize and formalize the established patterns, to identify the most important factors to be measured and controlled during the MAO processing.

К л ю ч е в ы е с л о в а: микродуговое оксидирование, технологические режимы, свойства, модель в виде ориентированного графа, диаграмма связей.

К e y w o r d s: microarc oxidation, technological modes, properties, oriented graph model, connection diagram.

Введение

Покрyтия, полученные методом микродугового оксидирования (МДО) на деталях из сплавов алюминия, магния или титана, обладают высокими защитными, износостойкими, термостойкими, электроизоляционными свойствами, хорошей адгезией. Ряд современных исследований направлен на изучение процесса МДО, в частности, способы придания покрытиям новых свойств путем добавления в электролит наночастиц, рассмотрены в работе [1]; поиску новых направлений применения МДО-покрытий посвящен труд [2]; методы улучшения их характеристик изложены в работе [3], но самой важной до настоящего времени представляется проблема управляемости процесса МДО [4–7].

Технология микродугового оксидирования до настоящего времени не получила широкого распространения по ряду причин, к которым относится отсутствие как единого формализованного описания имеющих место явлений и эффектов, так и совокупного влияния на свойства покрытий разнородных факторов, что затрудняет поиск оптимальных технологических параметров процесса МДО. Практически не исследовано влияние температуры и выработки электролита (изменение концентрации компонентов от времени обработки) на свойства оксидных покрытий. Следует отметить, что в последнее время стали появляться работы, посвященные изучению данной функциональной зависимости [3]. Так, в работе [8] установлено, что снижение электропроводности электролита приводит к появлению более мощных микроразрядов, что позволяет получить покрытия большей толщины; также получена эмпирическая формула взаимосвязи напряжения пробоя V_{bd} и электропроводности электролита k :

$$V_{bd} = a + b \log\left(\frac{1}{k}\right),$$

где a и b – эмпирические коэффициенты.

Несмотря на многочисленность экспериментальных исследований влияния факторов технологического процесса МДО на свойства оксидных покрытий, в большинстве из них даются лишь практические рекомендации по достижению оптимального режима, которые оказываются неработоспособными при изменении условий технологического процесса (смене электролита, использовании другого материала заготовки, формы и частоты сигнала). Это подтверждает необходимость разработки теоретических моделей, значительно облегчающих поиск оптимального технологического режима получения оксидных покрытий с заданными свойствами, вплоть до его автоматизации.

Диаграмма связей факторов, влияющих на процесс МДО

В данной статье авторами предложен системный подход к описанию процесса МДО, что позволило:

- систематизировать и формализовать установленные закономерности влияния технологических параметров на свойства оксидных покрытий, а также выявить наиболее важные факторы, подлежащие измерению и контролю в процессе МДО-обработки;
- установить взаимосвязи между электрическими параметрами МДО-обработки, физическими явлениями, происходящими при формировании оксидных слоев и свойствами синтезируемых покрытий.

На рис. 1 показана диаграмма связей факторов, влияющих на процесс МДО, со свойствами получаемых покрытий и их параметрами качества. Диаграмма связей позволяет определить основные влияющие факторы для всего процесса МДО, а не только для отдельного свойства покрытия или параметра качества.

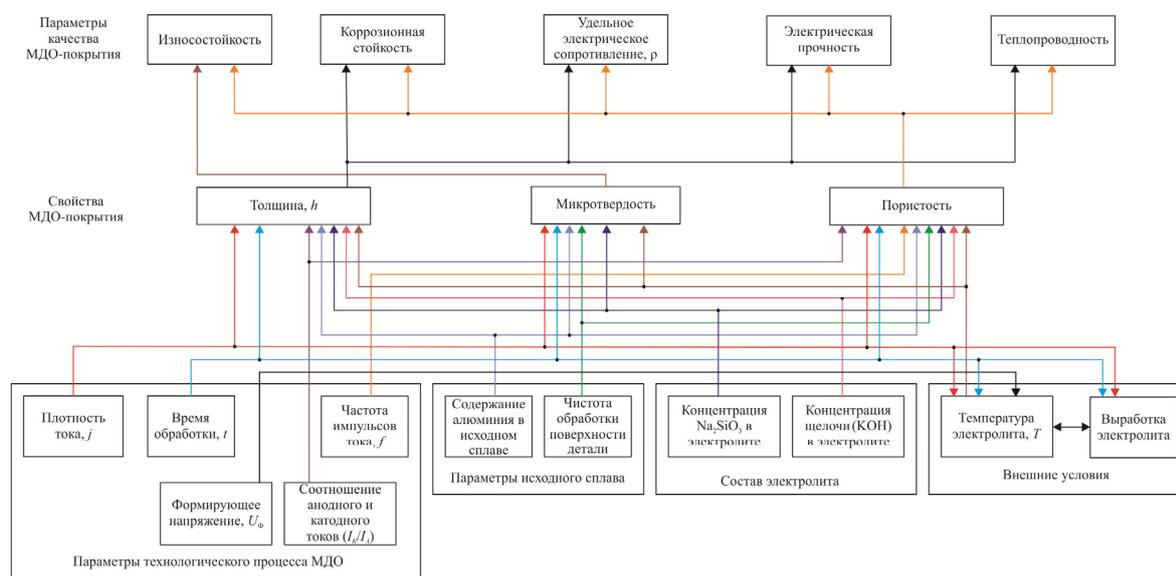


Рис. 1. Диаграмма связей

Анализ диаграммы связей позволил установить, что на все параметры качества влияют только три свойства оксидного покрытия: микротвердость, толщина и пористость, причем микротвердость влияет только на износостойкость. Однако, как следует из диаграмм Исикавы [9], содержание кристаллических модификаций оксида алюминия, которое в основном определяет микротвердость, также влияет на электрическую прочность и коррозионную стойкость.

Все факторы процесса МДО, которые можно разделить на параметры технологического процесса и исходного сплава, состав электролита и внешние условия, оказывают влияние на свойства МДО-покрытий. Основными параметрами технологического процесса МДО являются плотность тока и время обработки, связанные со всеми свойствами покрытий и обеспечивающие внешние условия (нагрев и выработку электролита). Формирующее напряжение (электрическое напряжения на образце с покрытием), которое также является одним из главных факторов процесса МДО, по сути, также определяется значением плотности тока. Частота токовых импульсов влияет только на пористость. Соотношение анодного и катодного токов влияет на толщину и пористость, но эти свойства покрытия определяют все параметры качества изделий с МДО-покрытием.

Влияние состава исходного сплава подчиняется следующей закономерности: чем больше процентное содержание алюминия в материале заготовки, тем более качественное формируется МДО-покрытие. Таким образом, микродуговому оксидированию целесообразно подвергать изделия из технического алюминия марки АД0 (содержание алюминия 99,8 %), АМг3 (содержание алюминия 94,9 %) и дюралюминия Д16 (содержание алюминия 92,8 %) [10]. Данный факт объясняется тем, что в составе алюминиевых сплавов имеются химические элементы, препятствующие образованию оксида алюминия, вследствие чего начальная структура МДО-покрытия имеет множество «слабых» мест, электрический пробой происходит при более низких значениях напряжения, и условия фазового перехода $\gamma-Al_2O_3 - \alpha-Al_2O_3$ реализуются в меньшей степени [11]. Шероховатость поверхности детали влияет на микротвердость и пористость: чем ниже шероховатость, тем микротвердость больше и меньше пористость.

Температура электролита оказывает влияние на все параметры качества МДО-покрытия. Однако она так же, как и выработка электролита, зависит от плотности тока, времени обработки и формирующего напряжения. Помимо этого, температура и выработка электролита являются взаимозависимыми. Это может быть объяснено следующим образом. Выработка электролита представляет собой уменьшение концентрации ионов в нем за счет включения их

в структуру МДО-покрытия. При увеличении плотности тока в микроузоре электролит в большей степени обедняется ионами, его проводимость уменьшается [12], а сопротивление и падение напряжения возрастают, следовательно, увеличивается мощность, рассеиваемая электролитом, что приводит к его нагреву. С другой стороны, при увеличении температуры электролита возрастает скорость химических реакций, больше молекул электролита диссоциирует на ионы, и большее их количество встраивается в покрытие, что еще сильнее повышает температуру электролита. Подобным образом на внешние условия влияет и время МДО-обработки.

Влияние состава электролита также имеет неоднозначный характер. В общем случае, концентрация веществ, образующих электролит, задается один раз перед началом процесса МДО и не меняется в процессе обработки (справедливо для КОН). В то же время концентрация технологического жидкого стекла Na_2SiO_3 , по-видимому, является функцией плотности тока, времени обработки и температуры электролита и обуславливает его выработку, поскольку в покрытие встраиваются именно силикат-ионы [11]. Кроме того, этот параметр может косвенно, через температуру электролита, влиять на все свойства МДО-покрытий.

Формализация процесса микродугового оксидирования

С точки зрения математического описания процесса МДО, параметры качества могут быть представлены в виде функций нескольких переменных, причем технологические параметры процесса являются независимыми переменными, в то время как внешние условия также являются функциями этих переменных. Параметры, отвечающие за состав исходного сплава и шероховатость поверхности, а также концентрацию щелочи (КОН) в электролите, целесообразно представить в виде констант, поскольку они не изменяются в процессе МДО. Таким образом, в первом приближении для эффективного управления процессом МДО необходимо учитывать следующие закономерности:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = F(j, t, U_F), \\ C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = F(j, t, T), \\ HV = F(j, t, T, p_{\text{Al}}, C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}, S), \\ h = F(j, t, T, I_K/I_A, p_{\text{Al}}, C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}, C_{\text{KOH}}), \\ P = F(j, t, T, f, I_K/I_A, p_{\text{Al}}, C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}, C_{\text{KOH}}, S), \\ E = F(h, P), \\ CR = F(h, P), \\ TC = F(h, P), \\ WR = F(HV, P), \end{array} \right.$$

где HV – микротвердость; h и P – толщина и пористость МДО-покрытия соответственно; E – электрическая прочность; CR – коррозионная стойкость; TC – теплопроводность; WR – износостойкость; U_F – формирующее напряжение; I_K/I_A – соотношение анодного и катодного токов; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$ – концентрация жидкого стекла в электролите; $C_{\text{KOH}} = \text{const}$ – концентрация щелочи в электролите; $p_{\text{Al}} = \text{const}$ – процентное содержание алюминия в исходном сплаве; $S = \text{const}$ – чистота обработки поверхности детали.

Учитывая то, что T и $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$ являются функциями, получим

$$\left\{ \begin{array}{l} HV = F(j, t, U_F, p_{\text{Al}}, S), \\ h = F(j, t, U_F, I_K/I_A, p_{\text{Al}}, C_{\text{KOH}}), \\ P = F(j, t, U_F, f, I_K/I_A, p_{\text{Al}}, C_{\text{KOH}}, S), \\ E = F(h, P), \\ CR = F(h, P), \\ TC = F(h, P), \\ WR = F(HV, P). \end{array} \right. \quad (1)$$

Параметры реакции: h, P, C_N, T, WR – износостойкость, CR – коррозионная стойкость, HV – микротвердость, E – электрическая прочность, TC – теплопроводность.

Описание взаимосвязи параметров на основе теории множеств

Ряд параметров зависит от других факторов и, в свою очередь, влияет на параметры процесса. Эти параметры выступают и в качестве воздействий, и реакций:

$$T, h, P, C_N, HV.$$

Распределение факторов по множествам, в зависимости от их влияния на другие параметры, приведено на рис. 3.

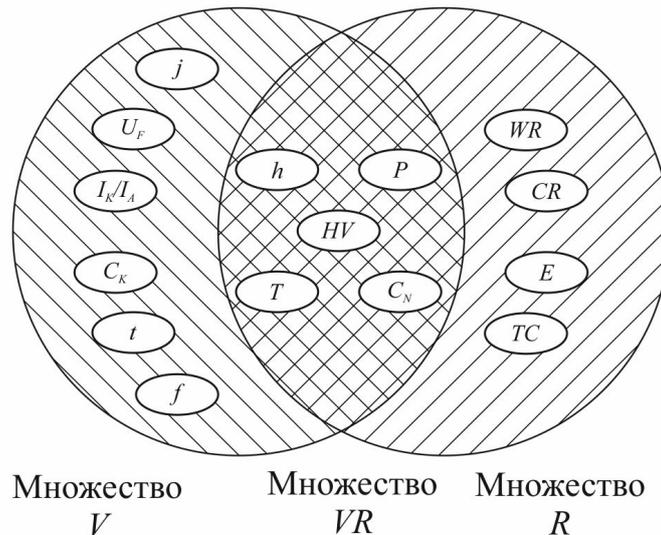


Рис. 3. Диаграмма Венна

На рис. 3 приняты следующие обозначения: множество воздействующих факторов V , факторов-реакций – R . Параметры, которые выступают и воздействиями, и реакциями на другие воздействия, образуют множество VR :

$$VR = V \cap R = \{x | x \in V \wedge x \in R\},$$

где x – элементы множеств. В рассматриваемом случае

$$V = \{U_F, I_K/I_A, j, C_K, f, t, h, P, HV, T, C_N\},$$

$$R = \{WR, CR, E, TC, h, P, HV, T, C_N\},$$

$$VR = \{h, P, HV, T, C_N\}.$$

Множество параметров-воздействий A , которые не являются реакциями:

$$A = \{U_F, I_K/I_A, j, C_K, f, t\}$$

может быть найдено как разность множеств

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

Взаимосвязи между параметрами МДО-процесса и свойствами оксидных покрытий

Взаимосвязи между параметрами МДО-процесса и свойствами оксидных покрытий можно формализовать в виде выражений, характеризующих физический эффект (изменение реакции вследствие воздействия), что сведено в табл. 2.

Таблица 2

Взаимосвязи между параметрами МДО-процесса и свойствами оксидных покрытий

Свойство	Математическое описание	Свойство	Математическое описание
th	$th = \frac{\partial h}{\partial t}$	tT	$tT = \frac{\partial T}{\partial t}$
UH	$UH = \frac{\partial HV}{\partial U_F}$	Uh	$Uh = \frac{\partial h}{\partial U_F}$
TH	$TH = \frac{\partial HV}{\partial T}$	Th	$Th = \frac{\partial h}{\partial T}$
jH	$jH = \frac{\partial HV}{\partial j}$	jT	$jT = \frac{\partial T}{\partial j}$
$C_N H$	$C_N H = \frac{\partial HV}{\partial C_N}$	$C_N T$	$C_N T = \frac{\partial T}{\partial C_N}$
tH	$tH = \frac{\partial HV}{\partial t}$	tP	$tP = \frac{\partial P}{\partial t}$
PW	$PW = \frac{\partial WR}{\partial P}$	HW	$HW = \frac{\partial WR}{\partial HV}$
UP	$UP = \frac{\partial P}{\partial U_F}$	UT	$UT = \frac{\partial T}{\partial U_F}$
TC_N	$TC_N = \frac{\partial C_N}{\partial T}$	TP	$TP = \frac{\partial P}{\partial T}$
tC_N	$tC_N = \frac{\partial C_N}{\partial t}$	jC_N	$jC_N = \frac{\partial C_N}{\partial j}$
jh	$jh = \frac{\partial h}{\partial j}$	jP	$jP = \frac{\partial P}{\partial j}$
$C_N h$	$C_N h = \frac{\partial h}{\partial C_N}$	$C_N P$	$C_N P = \frac{\partial P}{\partial C_N}$
Ih	$Ih = \frac{\partial P}{\partial t}$	IP	$IP = \frac{\partial P}{\partial I}$
hE	$hE = \frac{\partial E}{\partial h}$	PE	$PE = \frac{\partial E}{\partial P}$
$C_K h$	$C_K h = \frac{\partial h}{\partial C_K}$	$C_K P$	$C_K P = \frac{\partial P}{\partial C_K}$
hCR	$hCR = \frac{\partial CR}{\partial h}$	PCR	$PCR = \frac{\partial CR}{\partial P}$
hTC	$hTC = \frac{\partial TC}{\partial h}$	PTC	$PTC = \frac{\partial TC}{\partial P}$

Взаимосвязи параметров МДО-процесса, показанные на ориентированном графе (рис. 2), можно описать аналитически в виде системы уравнений:

$$\begin{cases}
 \partial WR = HW \cdot \partial HV + PW \cdot \partial P, \\
 \partial T = UT \cdot \partial U_F + tT \cdot \partial t + C_N T \cdot \partial C_N + jT \cdot \partial j, \\
 \partial CR = hCR \cdot \partial h + PCR \cdot \partial P, \\
 \partial HV = UH \cdot \partial U_F + TH \cdot \partial T + jH \cdot \partial j + C_N H \cdot \partial C_N + tH \cdot \partial t, \\
 \partial h = Ih \cdot \partial (I_K / I_A) + Uh \cdot \partial U_F + Th \cdot \partial T + jh \cdot \partial j + C_N h \cdot \partial C_N + th \cdot \partial t + C_K h \cdot \partial C_K, \\
 \partial E = hE \cdot \partial h + PE \cdot \partial P, \\
 \partial P = UP \cdot \partial U_F + TP \cdot \partial T + IP \cdot \partial (I_K / I_A) + C_K P \cdot \partial C_K + jP \cdot \partial j + C_N P \cdot \partial C_N + tP \cdot \partial t + fP \cdot \partial f, \\
 \partial C_N = jC_N \cdot \partial j + TC_N \cdot \partial T + tC_N \cdot \partial t, \\
 \partial TC = hTC \cdot \partial h + PTC \cdot \partial P.
 \end{cases} \quad (2)$$

Количество уравнений в системе (2) равно числу элементов множества R параметров-реакций. В левой части каждого уравнения – приращение соответствующего параметра реакции; в правой части – сумма произведений свойств и приращений параметров-воздействий. Все параметры-реакции, за исключением температуры T , характеризуют свойства формируемых покрытий.

Например, согласно первому уравнению системы (2) на износостойкость WR оказывают влияние микротвердость HV и пористость оксидного слоя, на которые, в свою очередь, оказывает влияние совокупность взаимосвязанных факторов: температура T , химический состав электролита, время обработки t , плотность тока j , что описывают соответствующие выражения системы (2).

В технологических процессах синтеза оксидных покрытий, как правило, необходимо стабилизировать следующие технологические параметры: температуру T (обеспечивается за счет термостатирования гальванической ячейки) и химический состав электролита (за счет постоянства концентрации его компонентов C_K и C_N), частоту токовых импульсов f и соотношение анодного и катодного токов (определяется настройкой технологического оборудования). При известной зависимости микротвердости HV от времени обработки t и плотности тока j , уравнение для микротвердости существенно упростится:

$$\partial HV = UH \cdot \partial U_F + jH \cdot \partial j + tH \cdot \partial t, \quad (3)$$

при условии, что $T, C_N, C_K = \text{const}$. Таким образом, микротвердость HV может быть определена косвенно по временным зависимостям напряжения $U_F(t)$ (формовочной кривой) и тока в процессе микродугового оксидирования.

Применяя аналогичные рассуждения ко всем уравнениям системы (2) и полагая, что параметры-воздействия и реакции поддаются измерению в ходе экспериментов, получаем модель взаимосвязи параметров МДО-процесса в виде

$$\begin{cases}
 \partial WR = HW \cdot \partial HV + PW \cdot \partial P, \\
 \partial CR = hCR \cdot \partial h + PCR \cdot \partial P, \\
 \partial HV = UH \cdot \partial U_F + jH \cdot \partial j + tH \cdot \partial t, \\
 \partial h = Uh \cdot \partial U_F + jh \cdot \partial j + th \cdot \partial t, \\
 \partial E = hE \cdot \partial h + PE \cdot \partial P, \\
 \partial P = UP \cdot \partial U_F + jP \cdot \partial j + tP \cdot \partial t, \\
 \partial TC = hTC \cdot \partial h + PTC \cdot \partial P.
 \end{cases} \quad (4)$$

Заключение

Уравнения 3, 4 и 6 системы (4) содержат в правых частях только технологические параметры и не содержат свойства покрытий. По сути, эти уравнения описывают влияние технологических параметров U_F, j, t на микротвердость, толщину и пористость оксидного слоя, следовательно, для косвенного измерения этих величин достаточно провести измерение формовочных кривых и временных зависимостей тока микроплазменного процесса $j(t)$ (или динамических вольтамперных характеристик). Тогда все остальные параметры покрытий: из-

носостойкость WR , коррозионная стойкость CR , теплопроводность TC и электрическая прочность E – могут быть рассчитаны на основании их зависимостей от микротвердости HV и пористости P .

Таким образом, основными параметрами, подлежащими измерению в ходе процесса МДО, являются плотность тока, формовочное напряжение и время обработки.

Библиографический список

1. Impedance monitoring of corrosion degradation of plasma electrolytic oxidation coatings (PEO) on magnesium alloy / L. Gawel, L. Nieuzyła, G. Nawrat, et al. // *J. of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 722. – P. 406–413.
2. Бориков, В. Н. Методы и средства измерений электрических параметров процесса формирования покрытий при импульсном энергетическом воздействии в растворах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Бориков В. Н. – Томск : ТПУ, 2012. – 34 с.
3. Кучмин, И. Б. Изменение физико-химических свойств двухкомпонентного электролита и характеристик покрытия, формируемого методом микродугового оксидирования, в ходе серийного производства / И. Б. Кучмин, Г. Г. Нечаев, Н. Д. Соловьева // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – № 3 (72). – С. 80–86.
4. Кучмин, И. Б. Плотность тока как определяющий параметр микродугового оксидирования / И. Б. Кучмин, Г. Г. Нечаев // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – № 1 (69). – С. 62–66.
5. Кучмин, И. Б. О характере изменений физико-химических свойств двухкомпонентного силикатно-щелочного электролита для микродугового оксидирования в ходе серийного производства / И. Б. Кучмин, Г. Г. Нечаев, Н. Д. Соловьева // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – № 4 (73). – С. 57–62.
6. Sarbishei, S. Effects of alumina nanoparticles concentration on microstructure and corrosion behavior of coatings formed on titanium substrate via PEO process / S. Sarbishei, M. A. Faghihi Sani, M. R. Mohammedi // *Ceramics Int.* – 2016. – Vol. 42. – P. 8789–8797.
7. Rehman, Z. Ur. Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ concentration on the microstructure and corrosion properties of two-step PEO coatings formed on AZ91 alloy / Z. Ur. Rehman, B. H. Koo // *Surf. & Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 317. – P. 117–124.
8. Vatan, H. N. Structural, tribological and electrochemical behavior of SiC nanocomposite oxide coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ31 magnesium alloy / H. N. Vatan, R. Ebrahimi-kahrizangi, M. Kasiri-asgarani // *J. of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 683. – P. 241–255.
9. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, М. И. Сафронов, А. В. Печерский // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 363–369.
10. Особенности динамики роста оксидного слоя на сплаве АК9 при микродуговом оксидировании / М. М. Криштал, П. В. Ивашин, А. В. Полунин, А. Е. Пестряков, М. С. Макоткин // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2011. – № 4 (18). – С. 60–63.
11. Чубенко, А. К. Моделирование параметров энергетических потоков при импульсном пропускании электрического тока через границу раздела фаз металл-раствор электролита / А. К. Чубенко, А. И. Мамаев // *Фундаментальные исследования. Химические науки*. – 2013. – № 4. – С. 351–355.
12. Нечаев, Г. Г. Модель микрозарядов в процессе микродугового оксидирования / Г. Г. Нечаев // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – № 1 (69). – С. 107–112.
13. Голубков, П. Е. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, А. В. Мартынов // *Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. третьей Всерос. молодежной науч. конф.* – Тамбов, 2018. – С. 111–113.
14. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2019. – № 2. – С. 99–108.
15. Голубков, П. Е. Методы измерения температуры в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, А. В. Мартынов, Е. А. Печерская // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК – 2018) : материалы V Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 14 марта 2018 г.)*. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 245–248.

References

1. Gawel L., Nieuzyła L., Nawrat G. et al. *J. of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 722, pp. 406–413.
2. Borikov V. N. *Metody i sredstva izmereniy elektricheskikh parametrov protsessa formirovaniya pokrytiy pri impul'snom energeticheskom vozdeystvii v rastvorakh: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Methods and

- means of measuring the electrical parameters of the coating formation process under pulsed energy action in solutions: author's abstract ... dr. techn. sciences]. Tomsk: TPU, 2012, 34 p. [In Russian]
3. Kuchmin I. B., Nechaev G. G., Solov'eva N. D. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2013, no. 3 (72), pp. 80–86. [In Russian]
 4. Kuchmin I. B., Nechaev G. G. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2013, no. 1 (69), pp. 62–66. [In Russian]
 5. Kuchmin I. B., Nechaev G. G., Solov'eva N. D. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2013, no. 4 (73), pp. 57–62. [In Russian]
 6. Sarbishei S., Faghihi Sani M. A., Mohammadi M. R. *Ceramics Int.* 2016, vol. 42, pp. 8789–8797.
 7. Rehman Z. Ur., Koo B. H. *Surf. & Coat. Technol.* 2017, vol. 317, pp. 117–124.
 8. Vatan H. N., Ebrahimi-kahrizsangi R., Kasiri-asgarani M. *J. of Alloys and Compounds.* 2016, vol. 683, pp. 241–255.
 9. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Safronov M. I., Pecherskiy A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics]. 2019, vol. 24, no. 4, pp. 363–369. [In Russian]
 10. Krishtal M. M., Ivashin P. V., Polunin A. V., Pestryakov A. E., Makotkin M. S. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector of science of Tolyatti State University]. 2011, no. 4 (18), pp. 60–63. [In Russian]
 11. Chubenko A. K., Mamaev A. I. *Fundamental'nye issledovaniya. Khimicheskie nauki* [Fundamental study. Chemical science]. 2013, no. 4, pp. 351–355. [In Russian]
 12. Nechaev G. G. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2013, no. 1 (69), pp. 107–112. [In Russian]
 13. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Martynov A. V. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezhnoy nauch. konf.* [Radionics. Problems and prospects : proc. dokl. the third all-Russia youth scientific conf.]. Tambov, 2018, pp. 111–113. [In Russian]
 14. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Kozlov G. V., Pecherskiy A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2, pp. 99–108. [In Russian]
 15. Golubkov P. E., Martynov A. V., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK – 2018): materialy V Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (g. Penza, 14 marta 2018 g.)* [Information technologies in science and education. Problems and prospects (MNPC – 2018) : materials of V all-Russia. inter-University. scientific-practical Conf. (Penza, March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 245–248. [In Russian]

Печерская Екатерина Анатольевна

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

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

Голубков Павел Евгеньевич

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

Golubkov Pavel Evgenevich

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

Карпанин Олег Валентинович

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

Karpanin Oleg Valentinovich

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

Козлов Геннадий Васильевич

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvk17@yandex.ru.

Kozlov Gennadiy Vasilevich

doctor of technical sciences, professor,
director of Polytechnic Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Зинченко Тимур Олегович

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

Zinchenko Timur Olegovich

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

Смогунов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор-консультант,
кафедра теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vladimir.smogunov@mail.ru

Smogunov Vladimir Vasilievich

doctor of technical sciences, professor-consultant,
sub-department of theoretical and applied mechanics
and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Влияние технологических параметров на свойства покрытий, синтезируемых методом микродугового оксидирования / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, Т. О. Зинченко, В. В. Смогунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 89–99. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-11.

*Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, А. В. Печерский,
С. А. Гурин, Б. П. Сибринин, В. В. Антипенко*

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

*T. O. Zinchenko, E. A. Pecherskaya, A. V. Pecherskiy,
S. A. Gurin, B. P. Sibrinin, V. V. Antipenko*

ANALYSIS OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE SYNTHESIS PROCESS TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды (ППО) являются перспективными материалами элементов функциональной электроники, используются при создании «умных» стекол, в солнечных элементах. Это подтверждает актуальность разработки технологии синтеза прозрачных проводящих покрытий с заданными свойствами. Данная работа нацелена на обеспечение надлежащих показателей качества синтезируемых покрытий на основе применения инструментов контроля качества. *Материалы и методы.* Проанализировано влияние технологических режимов метода спрей-пиролиза (температуры подложки, давления в распылителе, расстояния между распылителем и подложкой, объема раствора, геометрического расположения; формы и размера подложки; скорость распыления) на параметры прозрачных проводящих оксидов, сгруппированные по трем основным группам: оптические, морфологические, электрофизические. *Результаты.* В результате анализа применимости семи известных инструментов контроля качества к технологическому процессу синтеза оксидных покрытий с заданными свойствами разработаны диаграммы Исикавы, диаграмма Парето, контрольные карты, способствующие решению задачи получения прозрачных проводящих тонких пленок с заданными свойствами. *Выводы.* На основе применения инструментов контроля качества систематизированы причины, влияющие на показатели качества прозрачных проводящих покрытий. Разработанные причинно-следственные диаграммы Исикавы позволили заключить, что основными показателями, влияющими на качество ППО, являются выбор прекурсора и примеси для раствора, подготовка раствора и подложки, выбор метода получения и конструкция распылителя и реакционной камеры. Посредством разработки кумулятивной кривой Парето установлено, что наиболее часто встречающимся дефектом является недопустимо высокое поверхностное сопротивление покрытий, и следовательно, с целью повышения качества покрытий первоочередными должны быть корректирующие меры в процессе синтеза, направленные на снижение сопротивления. В совокупности рассмотренные инструменты контроля качества внедрены при разработке технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза.

A b s t r a c t. *Background.* Transparent conductive oxides are promising materials for the elements of functional electronics; they are used to create smart glasses in solar cells. This confirms the relevance of developing a technology for the synthesis of transparent conductive coat-

ings with desired properties. This work is aimed at providing appropriate quality indicators of synthesized coatings based on the use of quality control tools. **Materials and methods.** The article analyzes the influence of the technological regimes of the spray pyrolysis method (substrate temperature, pressure in the atomizer, distance between the atomizer and the substrate, solution volume, geometric location; substrate shape and size; atomization speed) on the parameters of transparent conductive oxides, grouped into three main groups: optical, morphological, electrophysical. **Results.** As a result of the analysis of the applicability of seven well-known quality control tools to the technological process of synthesis of oxide coatings with desired properties, Ishikawa diagrams, Pareto diagrams, and control cards have been developed that contribute to solving the problem of obtaining transparent conductive thin films with desired properties. **Conclusions.** Based on the use of quality control tools, reasons are systematized for the quality indicators of transparent conductive coatings. The developed causal diagrams of Ishikawa made it possible to conclude that the main indicators affecting the quality of PPO are the choice of precursor and impurities for the solution, the preparation of the solution and substrate, the choice of the method of preparation and the design of the atomizer and reaction chamber. By developing a cumulative Pareto curve, it has been established that the most common defect is an unacceptably high surface resistance of coatings, and therefore, in order to improve the quality of coatings, corrective measures in the synthesis process aimed at reducing the resistance should be priority. In total, the considered quality control tools were introduced in the development of a technological process for the synthesis of transparent conductive oxides by spray pyrolysis.

К л ю ч е в ы е с л о в а: диаграмма Парето, диаграмма Исикавы, контрольная карта, прозрачные проводящие оксиды, тонкие пленки, параметры качества, спрей – пиролиз.

К e y w o r d s: Pareto diagram, Ishikawa diagram, control card, transparent conductive oxides, thin films, quality parameters, spray – pyrolysis.

Введение

В процессе отработки технологий синтеза прозрачных проводящих покрытий (ППП) необходим анализ параметров их качества. Чтобы понять причины, влияющие на потребительские свойства, необходимо организовать процесс сбора статистических данных и применить к ним инструменты контроля качества. На качество прозрачных проводящих оксидов сильно влияют разного рода дефекты, определение которых, а также причин их появления и необходимо осуществить. При этом причины могут заключаться и в технологических режимах, и в самой установке, и в ошибке оператора, и в некачественных материалах, что указывает на необходимость систематизации причин дефектов.

Сами дефекты также тоже могут различаться. Широкое распространение получили семь методов, которые превратились, по сути, в эффективные инструменты контроля качества. Методы являются простыми в реализации, но при этом достаточно эффективны для решения поставленных целей. Последовательность применения методов может быть различной. Как показывает практика, применение следующих известных методов с 95 % вероятностью позволяет решить поставленную задачу [1, 2]: контрольная карта; диаграмма Парето; контрольный листок; гистограмма; диаграмма Исикавы; стратификация; диаграмма разброса.

Применение диаграммы Исикавы для систематизации причин, влияющих на параметры качества прозрачных проводящих покрытий

Диаграмма Исикавы – инструмент контроля качества, который выявляет причинно-следственную связь, т.е. наиболее важные факторы, влияющие на конечный результат [3]. Если в результате технологического процесса качество покрытия оказалось неудовлетворительным, то это свидетельствует об отклонении требуемых технологических режимов от заданных условий. Если причину устранить, то качество получаемых изделий возрастет [4]. Для произ-

водства качественных прозрачных проводящих оксидов необходимо учитывать множество факторов. Основными факторами производства являются следующие технологические режимы [5, 6]:

- температура подложки;
- давление в распылителе;
- расстояние между распылителем и подложкой;
- объем раствора;
- геометрическое расположение;
- форма и размер подложки;
- скорость распыления.

Данные факторы напрямую оказывают влияние на параметры качества ППО, которыми являются три основных группы показателей [7]:

- оптические;
- морфологические;
- электрофизические.

К оптическим относят такие параметры, как показатель прозрачности в видимой и в инфракрасной области света, коэффициент преломления, коэффициент экстинкции и поглощения. Электрофизические параметры включают следующие: поверхностное сопротивление, удельная проводимость, концентрация и подвижность носителей заряда, длина свободного пробега, концентрация носителей заряда.

К морфологическим относятся следующие параметры: структура пленки (кристаллическая или аморфная), изотропность, равномерность и толщина пленки, а также фазовый состав.

Для составления диаграммы Исикавы необходимо определить, какие показатели влияют на качество формируемой оксидной пленки в зависимости от следующих факторов-причин: материалы; методы; субъективные факторы; внешние факторы; оборудование. Разработанная диаграмма Исикавы представлена на рис. 1.

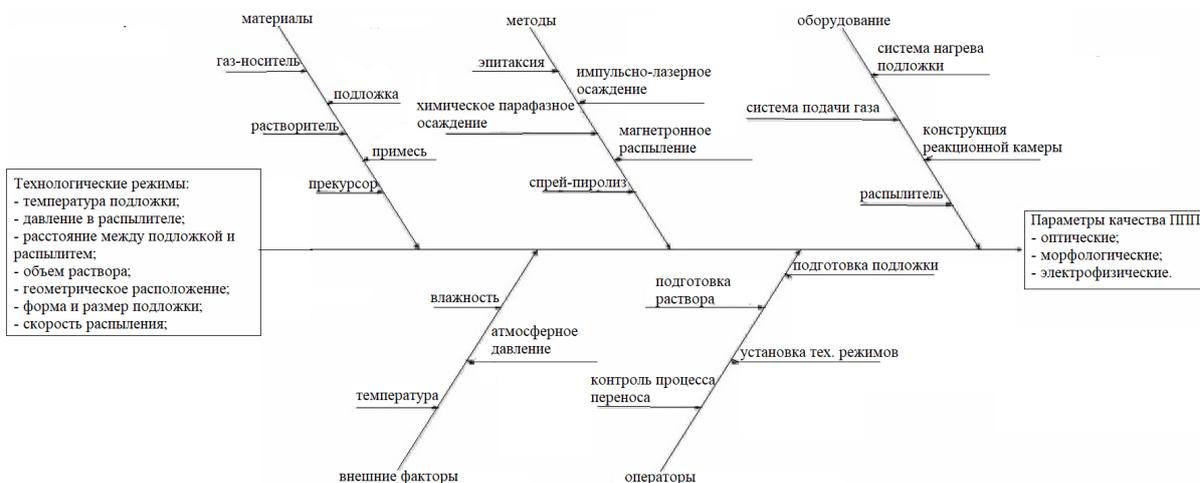
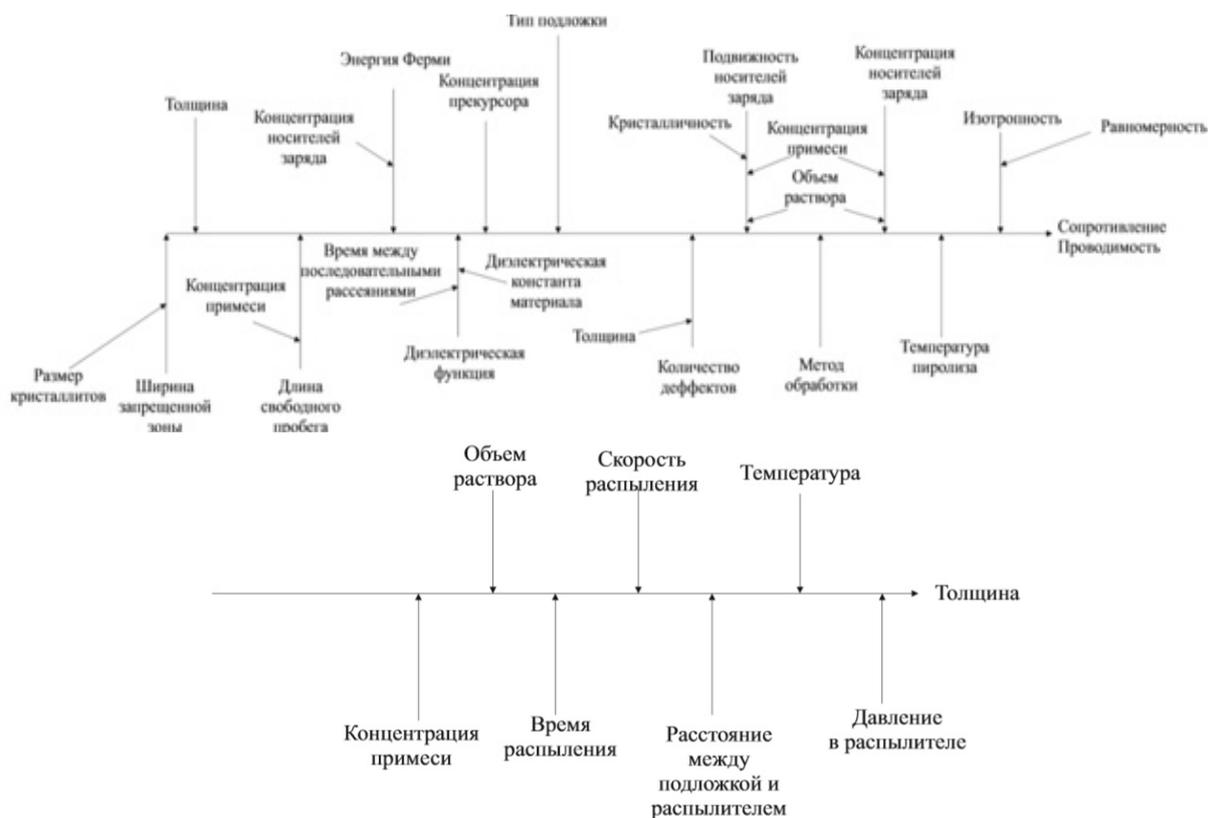


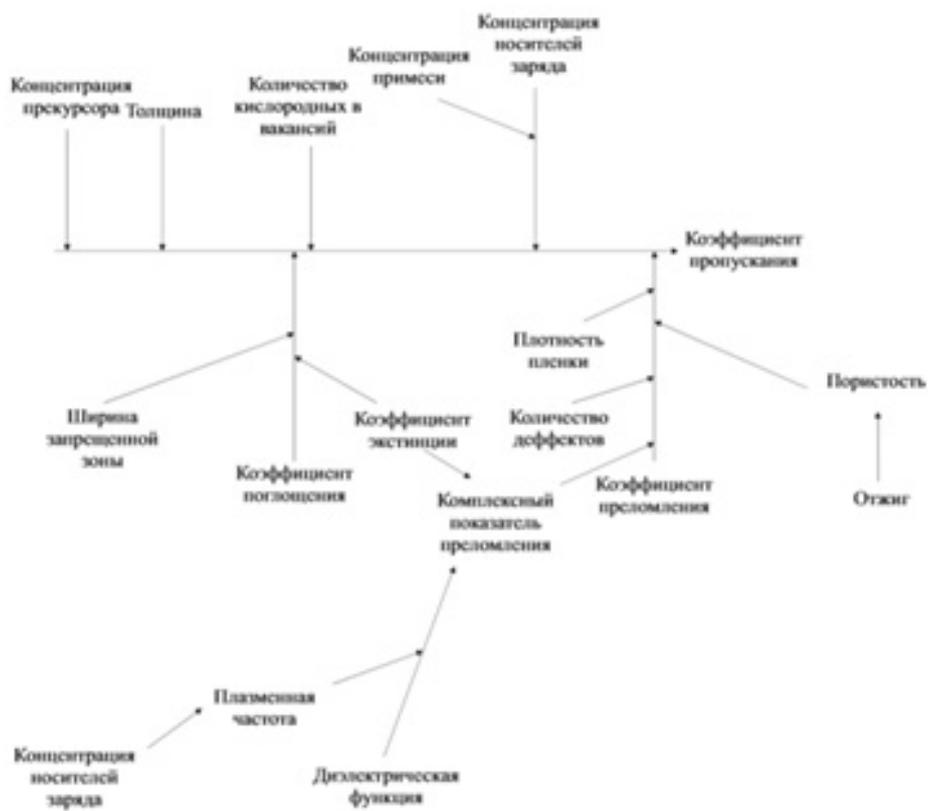
Рис. 1. Диаграмма Исикавы для процесса получения прозрачных проводящих оксидов

Основными показателями, влияющими на качество ППО, являются выбор прекурсора и примеси для раствора, подготовка раствора и подложки, выбор метода получения и конструкция распылителя и реакционной камеры [8–10]. Контроль требуемых значений перечисленных параметров способствует повышению качества покрытий, формированию покрытий с заданными свойствами.

Анализ причинно-следственных диаграмм дает возможность выявить основные факторы (причины), влияющие на данное свойство покрытия или одну из его эксплуатационных характеристик (параметров качества). С этой целью построены диаграммы Исикавы, учитывающие причины, определяющие следующие основные параметры качества ППО-покрытий: сопротивление (проводимость), коэффициент пропускания, коэффициент поглощения, толщина покрытия (рис. 2).



a)



b)

Рис. 2. Причинно-следственные диаграммы, учитывающие факторы, влияющие на следующие параметры качества ППО-покрытий: *a* – сопротивление (проводимость); *b* – коэффициент пропускания (начало)



Рис. 2. Причинно-следственные диаграммы, учитывающие факторы, влияющие на следующие параметры качества ППО-покрытий: в – коэффициент поглощения; г – толщину (окончание)

В качестве примера рассмотрим диаграмму Исикавы для анализа факторов, влияющих на сопротивление ППО-покрытия (рис. 2,а). На диаграмме стрелками показаны причинно-следственные взаимосвязи, причем стрелки направлены от причины к следствию. Например, стрелка «концентрация носителей заряда – сопротивление (проводимость)» свидетельствует о том, что концентрация носителей влияет на сопротивление (проводимость), а не наоборот. Если же стрелка направлена в обе стороны, это означает, что причина и следствие в равной степени влияют друг на друга. Анализ диаграммы (см. рис. 2) показывает, что на сопротивление ППО-покрытия оказывает влияние достаточно большое число факторов, в которые входят и состав раствора, и технологические параметры, и ряд параметров самого покрытия.

Разработка диаграммы Парето

Для повышения качества необходимо учитывать множество причин, влияющих на свойства ПП. Целесообразно классифицировать эти причины, поскольку существует множество второстепенных несущественных проблем, но при этом небольшое количество важных причин, влияющих на синтез оксидных покрытий с заданными свойствами. Анализ диаграмм Парето показывает, что наибольшее число дефектов возникает из-за относительно небольшого ряда проблем. Диаграмма Парето – это инструмент контроля качества, позволяющий распределить усилия для разрешения возникающих проблем и выявить основные причины. Различают два вида диаграмм Парето: по результатам деятельности и по причинам [11]. Для оценки качества ППО используется диаграмма Парето по причинам. Основными видами дефектов являются: неравномерность, высокое сопротивление, плохая изотропность, высокий показатель толщины и т.д. (табл. 1).

Таблица 1

Виды дефектов и их частота в полученных ППО

Виды дефектов	Количество дефектных образцов	Частота дефекта, %	Накопленная сумма дефектов, %
Неудовлетворительно высокое сопротивление	6	22	22
Неудовлетворительная равномерность	3	11	33
Неудовлетворительно высокая толщина	5	18	51
Неудовлетворительно низкая прозрачность	3	11	62
Неудовлетворительно низкая изотропность	2	7	69
Неудовлетворительный фазовый состав	2	7	76
Неудовлетворительная степень кристаллизации	0	0	76
Неудовлетворительно низкая подвижность	4	14	90
Неудовлетворительно низкая концентрация носителей	2	7	97
Неудовлетворительный показатель преломления	1	3	100

В результате анализа количества дефектных образцов, относящихся к тому или иному виду дефекта, построена кумулятивная кривая Парето (рис. 3).

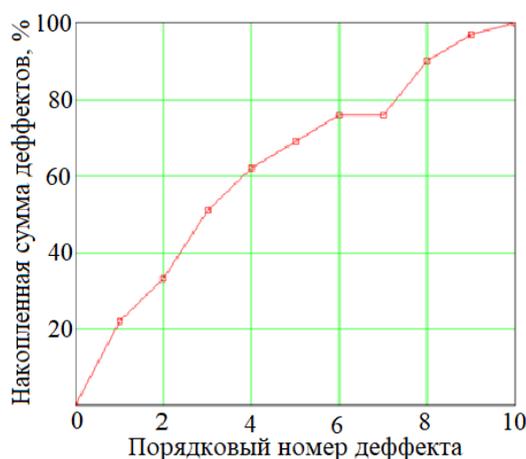


Рис. 3. Кумулятивная кривая Парето

Наиболее часто встречающимся дефектом является высокое сопротивление, которое необходимо устранить в первую очередь. *ABC*-анализ показал, что к группе *A* наиболее существенных дефектов относятся следующие: неудовлетворительно высокое сопротивление, неудовлетворительная равномерность, неудовлетворительно высокая толщина. Именно эти дефекты необходимо устранить в первую очередь. В группу *B* входят: неудовлетворительно низкая прозрачность, неудовлетворительно низкая изотропность, неудовлетворительный фазовый состав, неудовлетворительная степень кристаллизации. Остальные дефекты входят в группу *C*: они самые многочисленны, но при этом наименее значимы.

Контрольная карта

Так как анализ диаграммы Парето позволил выявить, что наиболее часто встречающийся дефект – неудовлетворительно высокое сопротивление оксидного покрытия, то далее следует подробнее рассмотреть этот дефект с помощью контрольной карты. Контрольная карта – инструмент, который позволяет отслеживать ход протекающего процесса и воздействовать на него, предупреждая его отклонение от заданных требований [4]. При разработке контрольной карты необходимо построить три линии (рис. 4). Центральная линия обозначает требуемое среднее значение исследуемого параметра, две другие линии, которые называются верхний и нижний контрольные пределы, определяют границы разброса величины.

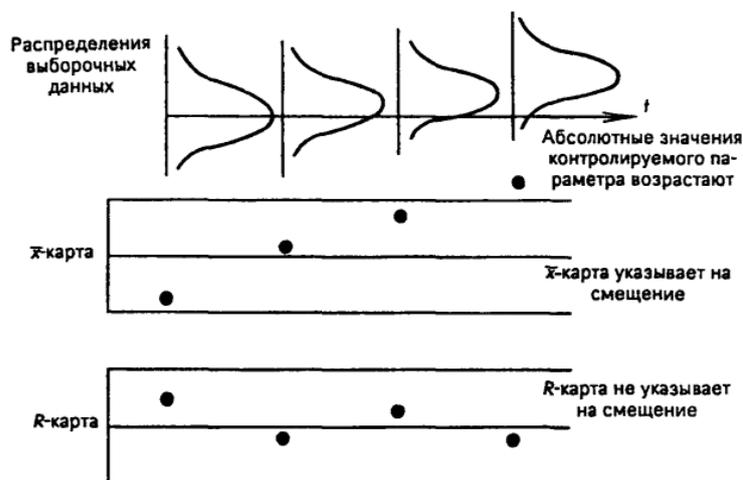


Рис. 4. Пример контрольной карты

Если все точки находятся между контрольными пределами, процесс считается контролируемым. Существуют разные типы контрольных карт, в основном используются семь типов, которые относятся к картам Шухарта: средних арифметических и размахов; медиан и размахов; индивидуальных значений; доли дефектной продукции; числа дефектных единиц продукции; числа дефектов; числа дефектов на единицу продукции.

Таким образом, посредством контрольных карт решены следующие задачи:

- контроль значений параметров оксидного покрытия;
- проверка стабильности технологического процесса [12, 13];
- немедленное принятие корректирующих мер непосредственно во время технологического процесса;
- проверка эффективности принятых мер.

В связи с тем, что в рассматриваемом случае актуальна задача контроля значений конкретной характеристики покрытия, то целесообразно использовать контрольные карты средних арифметических и размахов [14].

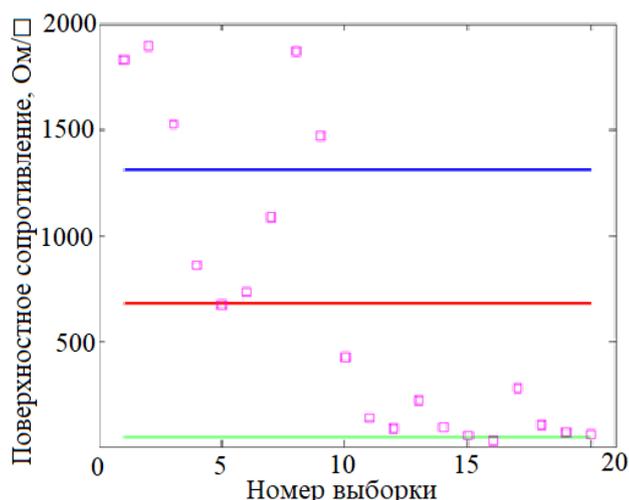


Рис. 5. Контрольная карты контроля сопротивления ППО

Контрольная карта сопротивлений прозрачных проводящих оксидов (рис. 5) показывает, что ряд значений поверхностного сопротивления вышел за граничные прямые. Но учитывая, что значения поверхностного сопротивления, которые находятся под нижней граничной кривой, наоборот, в лучшую сторону сказываются на качестве покрытия, стоит принимать во внимание только те выбросы, которые выходят за верхнюю граничную прямую.

Заключение

С целью анализа технологических режимов на параметры качества прозрачных проводящих покрытий построены диаграммы Исикавы, кумулятивная кривая Парето и контрольная карта сопротивлений. В соответствии с диаграммой Исикавы основными показателями, влияющими на качество ППО, являются выбор прекурсора и примеси для раствора, подготовка раствора и подложки, выбор метода получения и конструкции распылителя и реакционной камеры. Кумулятивная кривая Парето позволила определить, что наиболее часто встречающимся дефектом является недопустимо высокое сопротивление, которое необходимо устранить в первую очередь. В совокупности рассмотренные инструменты контроля качества внедрены при разработке технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза.

Библиографический список

1. Власов, А. И. Управление и контроль качества изделий электронной техники. Семь основных инструментов системного анализа при управлении качеством изделий электронной техники / А. И. Власов, В. В. Маркелов, Д. Е. Зотьева // Датчики и системы. – 2014. – № 8. – С. 55–66.
2. Голубков, П. Е. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, А. В. Мартынов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. третьей Всерос. молодежной науч. конф. – Тамбов, 2018. – С. 111–113.
3. Ребрин, Ю. И. Управление качеством : учеб. пособие / Ю. И. Ребрин. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2004. – С. 174.
4. Петрова, Е. И. Современные методы управления качеством / Е. И. Петрова // Научный альманах. – 2015. – № 8. – С. 864–868.
5. Зинченко, Т. О. Анализ методов получения прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 14 марта 2018 г.) / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 258–260.
6. Nikolaev, K. O. Influence of technological parameters on the energy efficiency of oxide solar cells / K. O. Nikolaev, E. A. Pecherskaya, A. A. Shamin // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM EDM 2018 : proceedings. – Novosibirsk, 2018. – P. 19–21.
7. Прозрачные проводящие оксиды и их применение в умных стеклах / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, А. М. Паличев, Б. П. Сибринин, А. М. Бибарсова // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения – 2019») : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. Е. А. Печерской. – Пенза, 2019. – С. 315–318.
8. 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.
9. Кондрашин, В. И. Исследование влияния концентрации примеси на поверхностное сопротивление в ППП (полученных методом спрей-пиролиза) на основе диоксида олова / В. И. Кондрашин, Е. А. Печерская // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всерос. молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск, 2016. – С. 175–176.
10. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis / Т. О. Zinchenko, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, A. S. Kozlyakov, K. O. Nikolaev, J. V. Shepeleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 225 (1). – P. 012255.
11. Ваньян, П. Л. Правило Парето и самоподобие в ABC-анализе / П. Л. Ваньян, А. И. Поташев // Исследовано в России. – 2005. – С. 1986–1995.
12. Controlling the temporal instability of the dielectric parameters of ferroelectrics / Е. А. Pecherskaya, V. A. Solov'ev, A. M. Metal'nikov, Y. A. Varenik, I. M. Gladkov, D. V. Ryabov // Semiconductors. – 2013. – Т. 47, № 13. – С. 1720–1722.
13. 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.
14. Гродзенский, С. Я. Об эффективности применения семи простых инструментов качества / С. Я. Гродзенский, Я. С. Гродзенский // Методы менеджмента качества. – 2012. – № 2. – С. 46–49.

References

1. Vlasov A. I., Markelov V. V., Zot'eva D. E. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2014, no. 8, pp. 55–66. [In Russian]
2. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Martynov A. V. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezhnoy nauch. konf.* [Radionics. Problems and prospects : proc. dokl. the third all-Russia. youth scientific conf.]. Tambov, 2018, pp. 111–113. [In Russian]
3. Rebrin Yu. I. *Upravlenie kachestvom: ucheb. posobie* [Quality management: tutorial]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004, p. 174. [In Russian]
4. Petrova E. I. *Nauchnyy al'manakh* [Scientific almanac]. 2015, no. 8, pp. 864–868. [In Russian]
5. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (g. Penza, 14 marta 2018 g.)* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of scientific articles of the all-Russian interuniversity. scientific-practical Conf. (Penza, March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 258–260. [In Russian]
6. Nikolaev K. O., Pecherskaya E. A., Shamin A. A. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM EDM 2018: proceedings*. Novosibirsk, 2018, pp. 19–21.
7. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Palichev A. M., Sibirin B. P., Bibarsova A. M. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2019»): materialy XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Methods, tools and technologies for obtaining and processing measurement information ("Shlyandinsky readings-2019"): materials of the XI international conference. scientific and technical conference with elements of a scientific school and a competition of research papers for students, postgraduates and young scientists]. Penza, 2019, pp. 315–318. [In Russian]
8. Pecherskaya R. M., Pecherskaya E. A., Metal'nikov A. M., Kondrashin V. I., Solov'ev V. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical Sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 237–241. [In Russian]
9. Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funktsional'noy elektroniki: materialy 19-y Vseros. molodezhnoy nauchnoy shkoly-seminara* [Actual problems of physical and functional electronics: materials of the 19th all-Russian conference. youth scientific school-seminar]. Ulyanovsk, 2016, pp. 175–176. [In Russian]
10. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Kozlyakov A. S., Nikolaev K. O., Shepeleva J. V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 225 (1), p. 012255.
11. Van'yan P. L., Potashev A. I. *Issledovano v Rossii* [Studied in Russia]. 2005, pp. 1986–1995. [In Russian]
12. 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.
13. 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* [News of higher educational institutions. Electronics]. 2013, no. 2 (100), pp. 84–88. [In Russian]
14. Grodzenskiy S. Ya., Grodzenskiy Ya. S. *Metody menedzhmenta kachestva* [Quality management methods]. 2012, no. 2, pp. 46–49. [In Russian]

Зинченко Тимур Олегович

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

Zinchenko Timur Olegovich

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

Печерская Екатерина Анатольевна

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

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

Печерский Анатолий Владимович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационного обеспечения
управления и производства,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ura258@yandex.ru

Pechersky Anatoly Vadimovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information support
for management and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Гурин Сергей Александрович

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

Gurin Sergey Alexandrovich

candidate of technical sciences,
head of department,
CJSC Medtehnika
(9 Srednyaya street, Penza, Russia)

Сибринин Борис Петрович

старший преподаватель,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sibrinin@rambler.ru

Sibrinin Boris Petrovich

senior lecturer,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Антипенко Владимир Викторович

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

Antipenko Vladimir Viktorovich

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

Образец цитирования:

Анализ параметров качества технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, А. В. Печерский, С. А. Гурин, Б. П. Сибринин, В. В. Антипенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 100–109. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-12.