

АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ВЫБОРЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ КОНТРОЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Д. Н. Новомейский¹, М. Н. Пиганов², Е. Т. Ескибаев³

^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия

³ Военный институт сил воздушной обороны, Актобе, Казахстан

^{1,2} kipres@ssau.ru, ³ erbol.eskibaev_26.04@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы данной работы обусловлена необходимостью повышения эффективности, достоверности и качества результатов измерительного контроля при электрофизической обработке пленочных резисторов микросборок высокочастотным факельным разрядом. Цель – анализ и оценка методических погрешностей процесса электрофизической обработки пленочных резисторов высокочастотным факельным разрядом, реализуемого по заданному алгоритму. *Материалы и методы.* Использованы компьютерное моделирование, программирование, натурный эксперимент, экспертные оценки. Проведен системный анализ погрешностей при электрофизической обработке пленочных резисторов высокочастотным факельным разрядом. Он показал, что основной вклад в точностные характеристики технологического устройства обработки вносят элементы методической, инструментальной и дополнительной погрешностей. Выявлены основные составляющие методической погрешности. Показано, что среди элементов общей методической погрешности определяющее значение имеет погрешность величины зазора между пленочным резистором и рабочим электродом технологического устройства обработки. При определении величины зазора между электродом и пленкой использовали формулу, входящую в состав модели обработки факельным разрядом. Для расчетов использовался математический пакет MathCAD. Детальный анализ процесса образования методической погрешности определения зазора между электродом и пленкой при работе технологического устройства показал, что основными факторами ее формирования являются мощность и температура факела, воздействующего на поверхность образца. Выполнена оценка методической погрешности величины зазора «резистор-электрод». *Результаты.* Получены математические выражения для определения методической погрешности. Общая методическая погрешность определения величины зазора для наихудшего случая равна 20 %. При оценке погрешности определения температуры факела использовали метод «прямоугольников». Он показал, что методическая погрешность определения температуры разряда составляет 2,6 %. *Выводы.* Приведенные результаты могут быть использованы при выборе измерительной части устройства контроля процесса обработки факельным разрядом, в процессе оптимизации измерительных процедур, а также в качестве исходных данных при разработке ИИС для технологического сопровождения процесса обработки пленочных структур.

Ключевые слова: факельный разряд, точность обработки, погрешности, методическая погрешность, зазор, мощность, температура, резистор, электрод, формулы для оценки, выбор, измерительная часть

Для цитирования: Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Ескибаев Е. Т. Анализ методической погрешности электрофизической обработки пленочных резисторов при выборе измерительной части контрольного устройства // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 68–74. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-7

ANALYSIS OF THE METHODOLOGICAL ERROR OF ELECTROPHYSICAL PROCESSING OF FILM RESISTORS WHEN CHOOSING THE MEASURING PART OF THE CONTROL DEVICE

D.N. Novomeisky¹, M.N. Piganov², E.T. Eskibaev³

^{1,2} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

³ Military Institute of Air Defense Forces, Aktobe, Kazakhstan

^{1,2} kipres@ssau.ru, ³ erbol.eskibaev_26.04@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic of this work is due to the need to improve the efficiency, reliability and quality of measurement control results during electrophysical processing of film resistors of microassemblies by high-frequency flare discharge. Purpose – Analysis and evaluation of methodological errors in the process of

electrophysical processing of film resistors by high-frequency flare discharge, implemented according to a given algorithm. *Materials and methods.* Computer modeling, programming, full-scale experiment, expert assessments were used. A systematic analysis of errors in the electrophysical processing of film resistors by high-frequency flare discharge is carried out. He showed that the main contribution to the accuracy characteristics of the technological processing device is made by the elements of methodological, instrumental and additional errors. The main components of the methodological error are revealed. It is shown that among the elements of the general methodological error, the error of the gap between the film resistor and the working electrode of the processing device is of decisive importance. When determining the size of the gap between the electrode and the film, the formula included in the flare discharge treatment model was used. The MathCAD mathematical package was used for calculations. A detailed analysis of the process of formation of the methodological error in determining the gap between the electrode and the film during the operation of the technological device showed that the main factors of its formation are the power and temperature of the torch acting on the surface of the sample. The estimation of the methodological error of the gap "resistor-electrode" is carried out. *Results.* Mathematical expressions for determining the methodological error are obtained. The general methodological error in determining the gap size for the worst case is 20 %. When estimating the error in determining the temperature of the torch, the method of "rectangles" was used. He showed that the methodological error in determining the discharge temperature is 2,6 %. *Conclusions.* These results can be used when selecting the measuring part of the flare discharge processing control device, in the process of optimizing measurement procedures, as well as as input data for the development of an AIS for technological support of the processing of film structures.

Keywords: flare discharge, processing accuracy, errors, methodological error, gap, power, temperature, resistor, electrode, formulas for evaluation, selection, measuring part

For citation: Novomeisky D.N., Piganov M.N., Eskibaev E.T. Analysis of the methodological error of electrophysical processing of film resistors when choosing the measuring part of the control device. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(4):68–74. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-7

Введение

В настоящее время в эксплуатации находится большое количество автономных измерительных приборов, соединенных с ЭВМ через стандартный интерфейс. Основным недостатком СИ этой группы является значительная избыточность, вызванная тем, что каждый из входящих в систему автономных приборов имеет свои органы управления и индикации, сравнительно мощный источник питания, а также встроенную ЭВМ.

Они достаточно дороги в эксплуатации, поэтому стремятся упростить измерительные блоки и реализовать магистрально-модульный принцип. В этом случае используется один или несколько измерительных модулей, которые соединены с управляющей ЭВМ через единую магистраль. Для сбора и обработки измерительной информации на данном этапе требуется разработка новой архитектуры средств измерения.

Одним из направлений повышения точности измерительных систем является оптимизация измерительных процедур [1] путем использования новых методов и алгоритмов. Для этого требуется провести анализ и оценку всех составляющих погрешностей измерения соответствующих параметров. В первую очередь необходимо получить аналитические выражения для методических погрешностей. Примером такого подхода является работа [2], в которой дана оценка методической погрешности измерения показателей степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума. Затем требуется оценить и дать рекомендации по минимизации суммарной методической погрешности. Следующим этапом может быть разработка адаптивных алгоритмов измерения исследуемых параметров. После этого можно переходить к разработке измерительной оснастки и дополнительных устройств [3].

Постановка задач

Целью данной работы является оценка и анализ методических погрешностей процесса электрофизической обработки пленочных резисторов микросборок высокочастотным факельным разрядом. Технологические основы обработки пленочных структур факельным разрядом (ФР) освещены в работах [4, 5]. Обработка производится в соответствии с алгоритмом [6].

Оценка и анализ методической погрешности

Элементы общей методической погрешности определения величины зазора между пленкой и электродом технологического устройства обработки факельным разрядом $\gamma_{\text{МЗ}}(P_{\text{ф}}, T_{\text{ф}})$ зависят от мощности и температуры факельного разряда, действующего на поверхность образца.

При определении величины зазора между электродом и пленкой была использована формула (1), которая является моделью подгонки факельным разрядом, при толщине подложки b , равной 1 мм. Для расчетов использовался математический пакет MathCAD [6]:

$$l = -\frac{\sqrt{5}\omega_{le}R_2}{2\sqrt{\omega v}} \ln \frac{G_1S + G_2 + \frac{8\pi \cdot 10^{-3}bt_p C_\phi^3}{\omega a^3 (G_1S + G_2) e^{\left(\frac{a}{2}T_\phi G_3 + \frac{3}{2}k_\phi T_\phi\right)}}}{P_\phi} - d. \quad (1)$$

Температура факельного разряда в процессе подгонки изменялась в пределах от 3500 до 4000 К с шагом 50 К, а мощность факельного разряда, формируемого с помощью генератора факельного разряда, изменялась переключателем мощности в пределах от 35 до 100 Вт с шагом 2,5 Вт. Из проведенного эксперимента по подгонке сопротивления пленочных резисторов было установлено, что оптимальный зазор между электродом и образцом 1 составляет 1,5 мм, или 0,0015 м. Таким образом, для нахождения методической погрешности определим зазор между электродом и образцом при минимальном ($P_\phi = 35$ Вт, $T_\phi = 3500$ К) и максимальном ($P_\phi = 100$ Вт, $T_\phi = 4000$ К) режимах работы генератора факельного разряда.

При $P_\phi = 35$ Вт, $T_\phi = 3500$ К имеем $l = 0,0018$ м, а при $P_\phi = 100$ Вт, $T_\phi = 4000$ К получим $l = 0,00129$ м.

Тогда

$$\gamma_{МЗ \max}(P_\phi, T_\phi) = \frac{0,0018 - 0,0015}{0,0015} \cdot 100\% = 20\%; \quad \gamma_{МЗ \min}(P_\phi, T_\phi) = \frac{0,00129 - 0,0015}{0,0015} \cdot 100\% = -14\%.$$

В итоге общая методическая погрешность определения величины зазора между электродом и пленкой для наихудшего случая будет равна $\gamma_{МЗ}(P_\phi, T_\phi) = 20\%$.

Для оценки методической погрешности определения температуры факельного разряда выберем известное решение уравнения теплопроводности, наиболее близкое для рассматриваемого случая [7]:

$$T(x, t) = \int_0^t q_1(\varepsilon) \frac{\partial \Theta(x, t - \varepsilon)}{\partial t} d\varepsilon + \int_0^t q_2(\varepsilon) \frac{\partial \Theta(b - x, t - \varepsilon)}{\partial t} d\varepsilon + T_0, \quad (2)$$

где $q_1(\varepsilon)$ – удельный тепловой поток на рабочую поверхность, Вт/м²; $q_2(\varepsilon)$ – удельный тепловой поток, отводимый с нижнего основания образца, Вт/м²; T_0 – начальная температура, К.

Температурная реакция тела на единичный тепловой поток $\Theta(x, t)$ на одной из границ определяется по формуле

$$\Theta(x, t) = \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{at}{b} + \frac{3(b-x)^2 - b^2}{6b} + \frac{2b}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k^2} \exp\left(-k^2 \pi^2 \frac{at}{b^2}\right) \cos\left(k\pi \frac{b-x}{b}\right) \right\}, \quad (3)$$

где b – толщина образца, м; $a = \lambda/C$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); C – объемная теплоемкость материала, Дж/(м³·К).

Все необходимые преобразования выражений выполнены в статье [8], поэтому приведем здесь конечную формулу для определения температуры поверхности образца:

$$T_{surf}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} T_{surf}(x) \exp(xt) dx \approx \int_{-x}^{+x} T_{surf}(x) \exp(xt) dx, \quad (4)$$

где x – максимальное машинное число; t – время, с.

Используя формулу (4), можно решить задачу не на всем бесконечном диапазоне значений аргумента x , а только на определенном интервале. Поэтому для решения будем использовать метод прямоугольников [9].

Для начала представим интеграл через сумму на небольших интервалах:

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^N \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx,$$

где $f(x) = T_{surf}(x) \exp(xt)$.

С учетом того, что $x_{i-\frac{1}{2}} = x_i - 0,5h$, где h – шаг, метод прямоугольников получается при использовании следующей замены:

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)dx \approx f(x_{i-\frac{1}{2}})h.$$

Для нахождения погрешности данного метода воспользуемся следующим выражением [9]:

$$\varphi_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)dx - f(x_{i-\frac{1}{2}})h.$$

Запишем данное выражение в виде, удобном для дальнейшей работы:

$$\varphi_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x)dx - f(x_{i-\frac{1}{2}}))dx. \quad (5)$$

Разложим первое слагаемое в интеграле (5) с помощью формулы Тейлора вблизи точки $x = x_{i-\frac{1}{2}}$.

При этом получаем

$$f(x) = f(x_{i-\frac{1}{2}}) + (x - x_{i-\frac{1}{2}})f'(x_{i-\frac{1}{2}}) + \frac{(x - x_{i-\frac{1}{2}})^2}{2} f''(\xi_i), \quad (6)$$

где $\xi_i \in [x_{i-1}, x_i]$. Подставляя формулу (6) в (5), получаем

$$\varphi_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left[(x - x_{i-\frac{1}{2}})f'(x_{i-\frac{1}{2}}) + \frac{(x - x_{i-\frac{1}{2}})^2}{2} f''(\xi_i) \right] dx. \quad (7)$$

Первое слагаемое в интеграле (7) равно нулю.

Таким образом, исходя из полученного результата погрешность при использовании метода прямоугольника с половинным дроблением будет выглядеть следующим образом:

$$\varphi_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{(x - x_{i-\frac{1}{2}})^2}{2} f''(\xi_i) dx. \quad (8)$$

Далее возьмем интеграл с учетом неравенства $f''(\xi_i) \leq \max_{x \in [x_{i-1}, x_i]} |f''(x)|$:

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{(x - x_{i-\frac{1}{2}})^2}{2} f''(\xi_i) dx = \frac{f''(\xi_i)}{2} \int_{x_{i-1}}^{x_i} (x - x_{i-\frac{1}{2}})^2 dx = \frac{f''(\xi_i)}{6} \left[\left(x - x_{i-\frac{1}{2}} \right)^3 \right]_{x_{i-1}}^{x_i} = \\ &= \frac{f''(\xi_i)}{6} \left[\left(x_i - x_{i-\frac{1}{2}} \right)^3 - \left(x_{i-1} - x_{i-\frac{1}{2}} \right)^3 \right] = \frac{f''(\xi_i)}{6} [(0,5h)^3 - (-0,5h)^3] = \\ &= \frac{f''(\xi_i)}{6} \cdot 0,25h^3 = \frac{f''(\xi_i)h^3}{24} \leq \frac{h^3}{24} \max_{x \in [x_{i-1}, x_i]} |f''(x)|. \end{aligned}$$

Таким образом, получаем погрешность результата при использовании метода прямоугольника с половинным дроблением в следующем виде [9]:

$$|\varphi_i| \leq \frac{h^3}{24} \max_{x \in [x_{i-1}, x_i]} |f''(x)|. \quad (9)$$

Формула (9) имеет погрешность $O(h^3)$ при $h \rightarrow 0$.

Проверим, какая погрешность будет при использовании метода прямоугольника для данной работы. Определим параметры в формуле (9), которые необходимы для нахождения погрешности:

1. Определение шага (h).

Чтобы найти шаг, необходимо определить правую и левую границы изменения аргумента x и количество точек разбиения. Будем рассматривать интегрирование при изменении значения x от -1000 до 1000 . Количество точек зададим величиной $10\,000$. Тогда шаг будет определяться следующим образом:

$$h = \frac{1000 - (-1000)}{10000} = 2 \cdot 10^{-1}.$$

2. Определение $\max_{x \in [x_{i-1}, x_i]} |f''(x)|$.

В качестве рассматриваемой функции возьмем все, что находится под интегралом в выражении (4):

$$f(x) = T_{surf}(x) \exp(xt).$$

Найдем первую производную от функции $f(x)$:

$$f'(x) = T'_{surf}(x) \exp(xt) + T_{surf}(x) t \exp(xt).$$

Аналогичным образом рассчитывается вторая производная от функции $f(x)$:

$$\begin{aligned} f''(x) = & T''_{surf}(x) \exp(xt) + T'_{surf}(x) t \exp(xt) + T'_{surf}(x) t \exp(xt) + T_{surf}(x) \exp(xt) + \\ & + T_{surf}(x) t^2 \exp(xt) = T''_{surf}(x) \exp(xt) + 2T'_{surf}(x) t \exp(xt) + T_{surf}(x) \exp(xt) + T_{surf}(x) t^2 \exp(xt). \end{aligned}$$

Далее необходимо вычислить модуль от $f''(x)$ в программной среде MathCAD и сделать цикл по всем отрезкам, которые составляют наш интервал с целью выявления максимума функции $f''(x)$.

После программирования данного аналитического выражения и его решения получаем $\max |f''(x)| = 2,7336 \cdot 10^5$. Таким образом, абсолютная погрешность используемого метода составляет

$$|\varphi_i| \leq \frac{(0,2)^3}{24} \cdot 2,7336 \cdot 10^5 \leq 91 \text{ К}.$$

Начальная температура факельного разряда при обработке образца составляет $T_{\phi 0} = 3500 \text{ К}$, следовательно, методическая погрешность определения температуры факельного разряда равна

$$\gamma_{\text{м т}} = \frac{3591 - 3500}{3500} \cdot 100 \% = 2,6 \%.$$

Заключение

Проведен системный анализ погрешностей при электрофизической обработке пленочных резисторов высокочастотным факельным разрядом. Он показал, что основной вклад в точностные характеристики технологического устройства обработки вносят элементы методической, инструментальной и дополнительной погрешностей. Выявлены основные составляющие методической погрешности. Показано, что среди элементов общей методической погрешности определяющее значение имеет погрешность величины зазора между пленочным резистором и рабочим электродом технологического устройства обработки. При определении величины зазора между электродом и пленкой использовали формулу, входящую в состав модели обработки факельным разрядом. Для расчетов использовался математический пакет MathCAD. Детальный анализ процесса образования методической погрешности определения зазора между электродом и пленкой при работе технологического устройства показал, что основными факторами ее формирования являются мощность и температура факела, воздействующего на поверхность образца. Выполнена оценка методической погрешности величины зазора «резистор – электрод».

Получены математические выражения для определения методической погрешности. Общая методическая погрешность определения величины зазора для наихудшего случая равна 20 %. При оценке погрешности определения температуры факела использовали метод «прямоугольников». Он показал, что методическая погрешность определения температуры разряда составляет 2,6 %.

Приведенные результаты могут быть использованы при выборе измерительной части устройства контроля процесса обработки факельным разрядом, в процессе оптимизации измерительных процедур, а также в качестве исходных данных при разработке ИИС для технологического сопровождения процесса обработки пленочных структур.

Указанные меры позволят повысить надежность и уменьшить риск отказов бортовой аппаратуры [10, 11].

Список литературы

1. Сергеев В. А., Резчиков С. Е. Оптимизация процедур измерения параметров низкочастотного шума со спектром вида $1/f$ // Автоматизация процессов управления. 2016. № 4. С. 101–107.
2. Сергеев В. А., Резчиков С. Е. Методическая погрешность измерений показателя степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 55–59.
3. Сергеев В. А., Резчиков С. Е. Адаптивные алгоритмы измерения параметров низкочастотного шума полупроводниковых приборов в условиях массового контроля // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 59–64.
4. Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Шопин Г. П., Денисюк А. А. Устройство для подгонки пленочных резисторов микросборок // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 28–35.
5. Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Денисюк А. А. Методика комбинированной подгонки пленочных резисторов факельным разрядом // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 3–9.
6. Новомейский Д. Н., Куликов А. В., Пиганов М. Н. Алгоритм процесса обработки пленочных структур факельным разрядом // Труды МАИ. 2019. № 109. С. 1–16. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=111411>
7. Колпаков В. А., Новомейский Д. Н., Новоженин М. Р. Определение температуры поверхности образца в области ее взаимодействия с потоком внеэлектродной плазмы с помощью преобразования Кирхгофа квадратичной функции // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, № 11. 9 с.
8. Казанский Н. Л., Колпаков А. И., Колпаков В. А., Паранин В. Д. Метод определения температуры поверхности в области ее взаимодействия с потоком низкотемпературной плазмы // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, № 12. С. 21–25.
9. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
10. Юрков Н. К. Современное состояние исследований в области создания высоконадежной бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 5–12.
11. Юрков Н. К. Модель оценивания риска отказа электронных средств длительного функционирования // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2018. № 1. С. 111–119.
12. Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Лупцов А. А., Перевертов В. П. Методика регулировки амплитудно-частотных характеристик фильтров // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 70–80.

References

1. Sergeev V.A., Rezchikov S.E. Optimization of procedures for measuring low-frequency noise parameters with a spectrum of the type $1/f$. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of control processes*. 2016;(4):101–107. (In Russ.)
2. Sergeev V.A., Rezchikov S.E. Methodological error in measuring the degree of frequency dependence of the low-frequency noise spectrum. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2015;(10):55–59. (In Russ.)
3. Sergeev V.A., Rezchikov S.E. Adaptive algorithms for measuring low-frequency noise parameters of semiconductor devices under mass control conditions. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2020;(11):59–64. (In Russ.)
4. Novomeyskiy D.N., Piganov M.N., Shopin G.P., Denisyuk A.A. Device for fitting film resistors of microassemblies. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic devices*. 2021;(1):28–35. (In Russ.)
5. Novomeyskiy D.N., Piganov M.N., Denisyuk A.A. Method of combined fitting of film resistors with flare discharge. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means*. 2021;(1):3–9. (In Russ.)
6. Novomeyskiy D.N., Kulikov A.V., Piganov M.N. Algorithm of the process of processing film structures by flare discharge. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2019;(109):1–16. (In Russ.). Available at: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=111411>
7. Kolpakov V.A., Novomeyskiy D.N., Novozhenin M.R. Determination of the surface temperature of a sample in the field of its interaction with an off-electrode plasma flow using the Kirchhoff transform of a quadratic function. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2013;83(11):9. (In Russ.)

8. Kazanskiy N.L., Kolpakov A.I., Kolpakov V.A., Pararin V.D. A method for determining surface temperature in the field of its interaction with a low-temperature plasma stream. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2007;77(12):21–25. (In Russ.)
9. Samarskiy A.A., Gulin A.V. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Moscow: Nauka, 1989:432. (In Russ.)
10. Yurkov N.K. The current state of research in the field of creating highly reliable on-board electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):5–12. (In Russ.)
11. Yurkov N.K. A model for assessing the risk of failure of long-term electronic devices. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii = Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 2018;(1):111–119. (In Russ.)
12. Novomeyskiy D.N., Piganov M.N., Luptsov A.A., Perevertov V.P. Methodology for adjusting the amplitude-frequency characteristics of filters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):70–80. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Николаевич Новомейский

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Dmitry N. Novomeisky

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

Михаил Николаевич Пиганов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
и технологии электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Mikhail N. Piganov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of construction
and technology of electronic systems and devices,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

Ербол Токтамысович Ескибаев

магистр, начальник кафедры тактики авиации,
Военный институт сил воздушной обороны,
(Казахстан, г. Актобе, пр-т Алии Молдагуловой, 39А)
E-mail: erbol.eskibaev_26.04@mail.ru

Erbol T. Eskibaev

Master degree student,
head of the sub-department of tactics of aviation,
Military Institute of Air Defense Forces
(39A Aliya Moldagulova avenue,
Aktobe, Kazakhstan)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 18.08.2024

Поступила после рецензирования/Revised 07.09.2024

Принята к публикации/Accepted 07.10.2024