ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
PHYSICAL SCIENCE OF MATERIALS

УДК 53.097 PACS: 07.50.Hp
EDN: NSEWXB

Исследование влияния величины сопротивления толстоплёночных резистивных компонентов на мощность низкочастотного шума

© В. А. Сокуренко*, Ю. В. Сахаров, С. А. Артищев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, 634050 Россия
** E-mail: sokurenko.sl.08@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 14.01.2025; после доработки 4.03.2025; принята к публикации 7.04.2025
Шифр научной специальности: 1.3.5

Приводятся результаты исследования спектральных характеристик мощности низкочастотного шума от сопротивления резисторов, выполненных по толстопленочной технологии методом принтерной печати, при двух режимах. Первый, при фиксированном напряжении на резисторе U = 3,6 В и второй при фиксированном токе I = 7,8 мА. Показано, что при уменьшении ширины резистивной пленки флуктуации сопротивления и среднеквадратичное значение мощности низкочастотного шума изменяются по квадратичному закону, на основе полученных характеристик спектральной плотности мощности низкочастотного шум. При этом среднеквадратичное амплитудное значение мощности шума увеличивается при фиксированном токе и уменьшается при фиксированном напряжении. С научной точки зрения получен важный результат, который в будущем может использоваться при исследовании механизмов электропроводности и оценки электрофизических параметров резистивных компонентов, а том числе анализе надежности резистивных компонентов на основе низкочастотного шума.

Ключевые слова: низкочастотный шум; мощность низкочастотно шума; флуктуации сопротивления; углеродный резистор; принтерная печать; толстопленочная технология.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-3-74-80

Введение

Особенности принтерной печати позволяют повысить плотность монтажа элементов на плате. Принтерная технология позволяет осуществлять печать функциональных элементов электронных компонентов с топологическими размерами bmin от 150 мкм, по сравнению с печатью через трафарет от 1000 мкм [1]. При этом современные пасты отличаются своими параметрами вязкости и состава, размеру частиц функционального материала, следовательно, и отличаются электрофизические параметры, в том числе и низкочастотный шум.

Явление низкочастотного шума представляет научный и практический интерес при рассмотрении вопросов, связанных с пределами точности измерений [2], качества пленки и надежности элементов [3]. Известно, что пассивные элементы, выполненные по толстоплёночной технологии, обладают более высоким уровнем шума, чем полупроводниковые и тонкоплёночные резистивные элементы [4]. Однако, несмотря на это, толстоплёночная технология и элементы на их основе нашли широкое применение в электронике, в том числе и в аппаратуре специального назначения.

Поэтому проблема низкочастотного шума для зернистых паст в принтерной печати

может быть решающей при рассмотрении вопросов о повышении плотности монтажа и анализа срока безотказной работы элемента. Большинство работ по пастам для толстоплёночной технологии посвящено исследованию размера частиц функционального материала [5, 6], составу паст и режимов их спекания [7]. В работах [8–10] можно встретить исследование корреляции спектра мощности низкочастотного шума и структурных особенностей материала.

Также одним из направлений работ является исследование влияния геометрических размеров образцов на амплитудное значение мощности низкочастотного шума. В работах [11–13] сравниваются резисторы с различным сопротивлением и геометрией. Однако по результатам этих работ невозможно определить, как уменьшение размеров образца влияет на низкочастотный шум при фиксированном и нефиксированном токе в цепи. При этом существующий эмпирический метод для определения влияния геометрии образцов на величину низкочастотного шума на основе выражения Хоуге [14] не применим для неоднородных материалов. Также в большинстве работ наблюдается расхождение экспериментальных данных с данным соотношением.

Поэтому целью данной работы является исследование влияния геометрических размеров толстоплёночных резисторов, полученных методом принтерной печати, на величину низкочастотного шума. Необходимо определить, как изменяется мощность низкочастотного шума при фиксированном токе или напряжении при уменьшении ширины резистора и также определить тип зависимости.

Материалы и методы

Для исследования резисторы были изготовлены на основе углеродосодержащей полимерной пасты ПУРП-0,05 (ООО «НПП ДЕЛЬТА-ПАСТЫ» г. Зеленоград) с поверхностным сопротивлением 50 Ом/кв. В качестве подложки использовался фольгированный стеклотекстолит FR-4, медная фольга которого использовалась в качестве контактных площадок. Все образцы для исследования были получены на одной подложке и при одинаковых режимах нанесения и спекания пасты. Нанесение пасты осуществлялось при помощи дозирующего принтера GPD Global «CATALINA». Спекание осуществлялось в муфельной печи при температуре 175 °С в течение часа согласно техническим условиям на пасты. После спекания медные контакты подвергались лужению припоем марки ПОС-61.

В таблице представлены геометрические размеры изготовленных образцов. Общими параметрами для всех резисторов являлась толщина и длина резистивной пленки. Ширина резистора изменялась количеством проходов дозатора с пастой от одной линии шириной $b = 0{,}37$ мм до четырех линий. Сопротивление изготовленных резисторов составило $R_1 = 458$ Ом, $R_2 = 198$ Ом, $R_3 = 47$ Ом, $R_4 = 33$ Ом.

Таблица 1

Геометрические размеры образцов для исследования

Образец	Сопротивление, Ом	Ширина резистора, мм	Длина резистора, мм
R_1	225	0,32	3,48
R_2	120	0,55	
R_3	58	1,05	
R_4	41	1,42	

В качестве измерительной установки для низкочастотного шума резисторов была использована схема, описанная в работе [15], которая содержит каскад малошумящих усилителей OP27 и полосовые фильтры. Экспериментальная установка, была дополнена высокочастотными и низкочастотными фильтрами на основе *RC*-элементов. Частота среза высокочастотного фильтра составляла 0,5 Гц. Выходной низкочастотный фильтр представлял перенастраиваемый фильтр с частотой среза $f = 10$ Гц, $f = 1$ кГц и $f = 10$ кГц. Для измерения эффективного значения теплового шума, исследуемые резисторы R_1–R_4 подключались к входу операционного усилителя. Затем для исследования низкочастотного шума подключался токоограничивающий резистор R_t и Ni-Mh аккумуляторная батарея.

Для токоограничивающего резистора R_t использовался металлопленочный резистор, так как данные резисторы обладают наименьшим уровнем шума. Таким образом, измеренный шум определялся шумом изготовленного резистора. Номиналы резисторов R_t были по-

добраны таким образом, чтобы на резисторе R_1–R_4 оставался постоянный уровень падения напряжения $U = 3{,}6$ В. После измерения низкочастотного шума при постоянном напряжении проводилось измерение шума при постоянном токе в цепи делителя напряжения $I = 7{,}8$ мА. Эффективное значение напряжения низкочастотного шума измерялось в полосе частот до $\Delta f = 10$ кГц.

При помощи осциллографа измерялась зависимость эффективное значение низкочастотного шума от времени, с последующим построением спектральной плотности мощности низкочастотного шума S в координатах $В^2$/Гц от Гц в двойном логарифмическом масштабе. Построение спектра осуществлялось при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ) в среде Matlab. После из полученных данных спектра рассчитывалось среднеквадратичное напряжение низкочастотного шума при частотах 10 Гц, 1 кГц, 10 кГц по формуле:

$$U_{ш} = S \cdot \sqrt{f} \qquad (1)$$

Среднеквадратичное значение мощности низкочастотного шума рассчитывалось по формуле:

$$P_{ш} = I \cdot U_{ш} \qquad (2)$$

где $U_{ш}$ – напряжение низкочастотного шума; I – ток в цепи делителя напряжения.

Результаты и обсуждение

На рисунках 1 и 2 представлены экспериментальные данные спектральной мощности низкочастотного шума резистивных компонентов R_1–R_4 при постоянном уровне падения напряжения и тока в цепи делителя напряжения. На рисунке 1 представлено изменение мощности при постоянном падении напряжения на всех элементах $U = 3{,}6$ В. На рисунке 2 представлено изменение мощности при постоянном токе в цепи делителя напряжения на всех элементах $I = 7{,}8$ мА.

Уровень теплового шума для исследуемых резисторов составил $(75{,}8–5{,}46)\times10^{-19}$ $В^2$/Гц для исследуемых резисторов. Наклон спектральной плотности мощности γ находился в диапазоне 1,11–1,26. Первичный анализ данных полученных спектров показал, что при уменьшении ширины резистивной пленки наблюдается увеличение спектра мощности низкочастотного шума как при постоянном падении напряжения на резисторе, так и при постоянном токе в цепи делителя напряжения. На основании полученных спектральных характеристик шума был осуществлен расчет среднеквадратичного значения мощности низкочастотного шума по формулам (1) и (2). В таблице 2 представлен расчет эффективного значения мощности низкочастотного шума для полученных спектров при частотах 10 Гц, 1 кГц, 10 кГц.

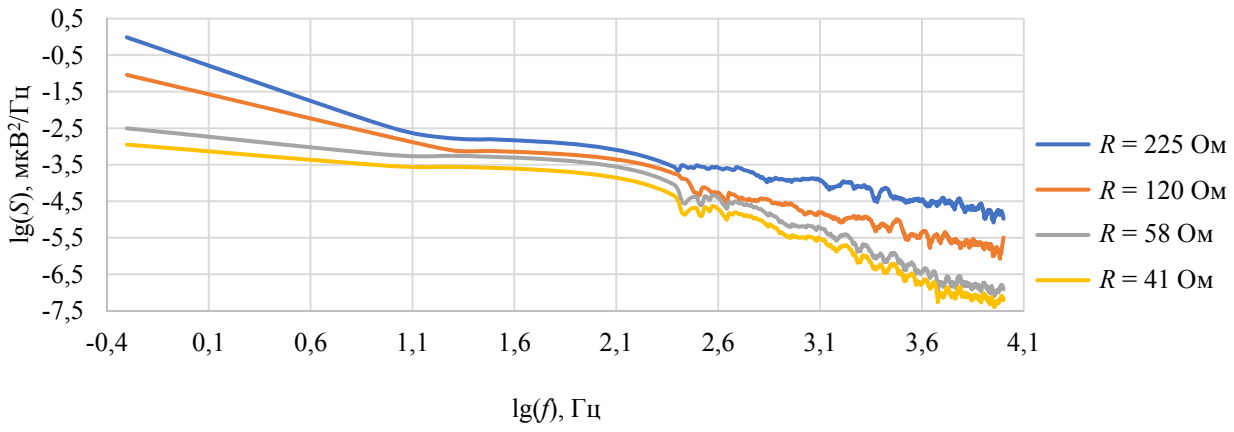

Рис. 1. Изменение спектральной характеристики напряжения низкочастотного шума при постоянном напряжении U = 3,6 В для резисторов R_1–R_4 в двойном логарифмическом масштабе

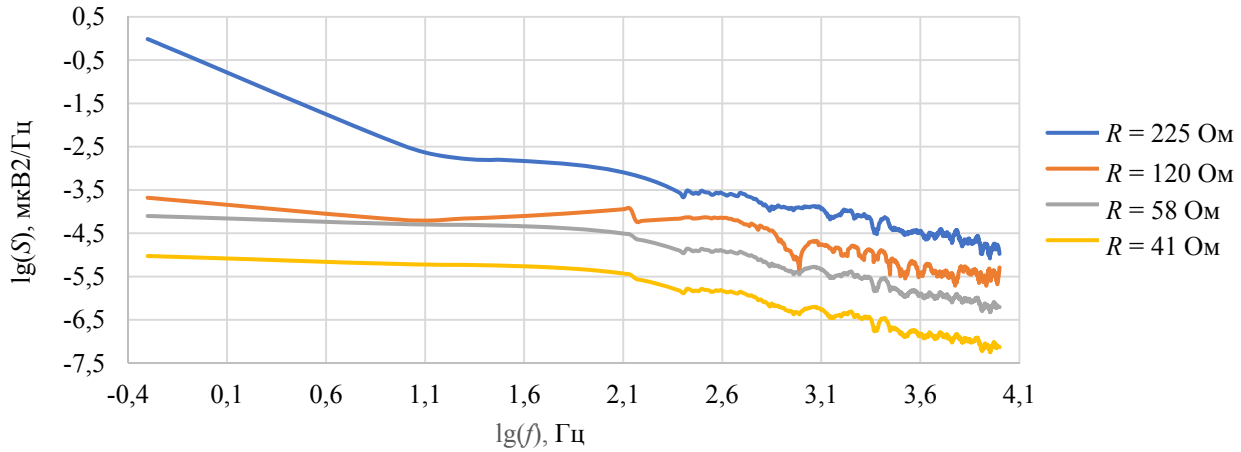

Рис. 2. Изменение спектральной характеристики напряжения низкочастотного шума при постоянном токе I = 7,8 мА для резисторов R_1–R_4 в двойном логарифмическом масштабе

Таблица 2

Изменение эффективного значения мощности низкочастотного шума для резисторов R_1-R_4

Постоянный параметр	Амплитудное значение мощности шума $P_ш$, мкВт				Полоса частот Δf
	R_1 = 225 Ом	R_2 = 120 Ом	R_3 = 58 Ом	R_4 = 41 Ом	
U = 3,6 В	1,33	2,73	4,21	5,12	10 Гц
	3,51	4,13	4,42	5,29	1 кГц
	3,95	5,37	5,12	5,94	10 кГц
I = 7,8 мА	1,04	0,20	0,18	0,06	10 Гц
	2,74	0,83	0,51	0,18	1 кГц
	3,06	1,76	0,61	0,21	10 кГц

При постоянном падении напряжения на резисторах при уменьшении сопротивления в цепи делителя ток растет, однако при этом наблюдается уменьшение эффективного значения мощности низкочастотного шума. А при постоянном токе и уменьшении сопротивления падение напряжение уменьшается на исследуемых образцах и наблюдается рост мощности низкочастотного шума. В обоих случаях изменение эффективного мощности низкочастотного шума от номинала резистора описывается квадратичной зависимостью с достоверностью аппроксимации R^2 более 0,99.

Полученные зависимости нельзя объяснить нагревом резистора, при котором происходит уменьшение сопротивления образцов вследствие отрицательного ТКС. Поэтому было предложено построить зависимость среднеквадратичного значения флуктуации (шум) сопротивления, как частное $U_ш$ и I. На рисунке 3 представлены зависимости флуктуации сопротивления от сопротивления исследуемых образцов.

Независимо от тока и напряжения, флуктуации сопротивления растут при увеличении сопротивления образцов по квадратичному. По полученным данным следует, что флуктуации сопротивления не зависят от приложенного тока или напряжения и определяются геометрией и структурой материала. Поскольку сопротивление обратно пропорционально электропроводности уменьшение размеров образца, вероятно, влияет на подвижность или концентрацию носителей заряда, что проявляется в виде измеренных флуктуаций сопротивления и амплитудных значений мощности низкочастотного шума при фиксированном токе и напряжении. Полученные зависимости можно объяснить эмпирическим соотношением Хоуге, связывающим спектр низкочастотного шума с концентрацией носителей заряда. Но приведенные ссылки во введении данной работы указывают, что данное соотношение не применимо в большинстве случаев. Так как явление низкочастотного шума имеет более сложную зависимость, что и наблюдается в данной работе.

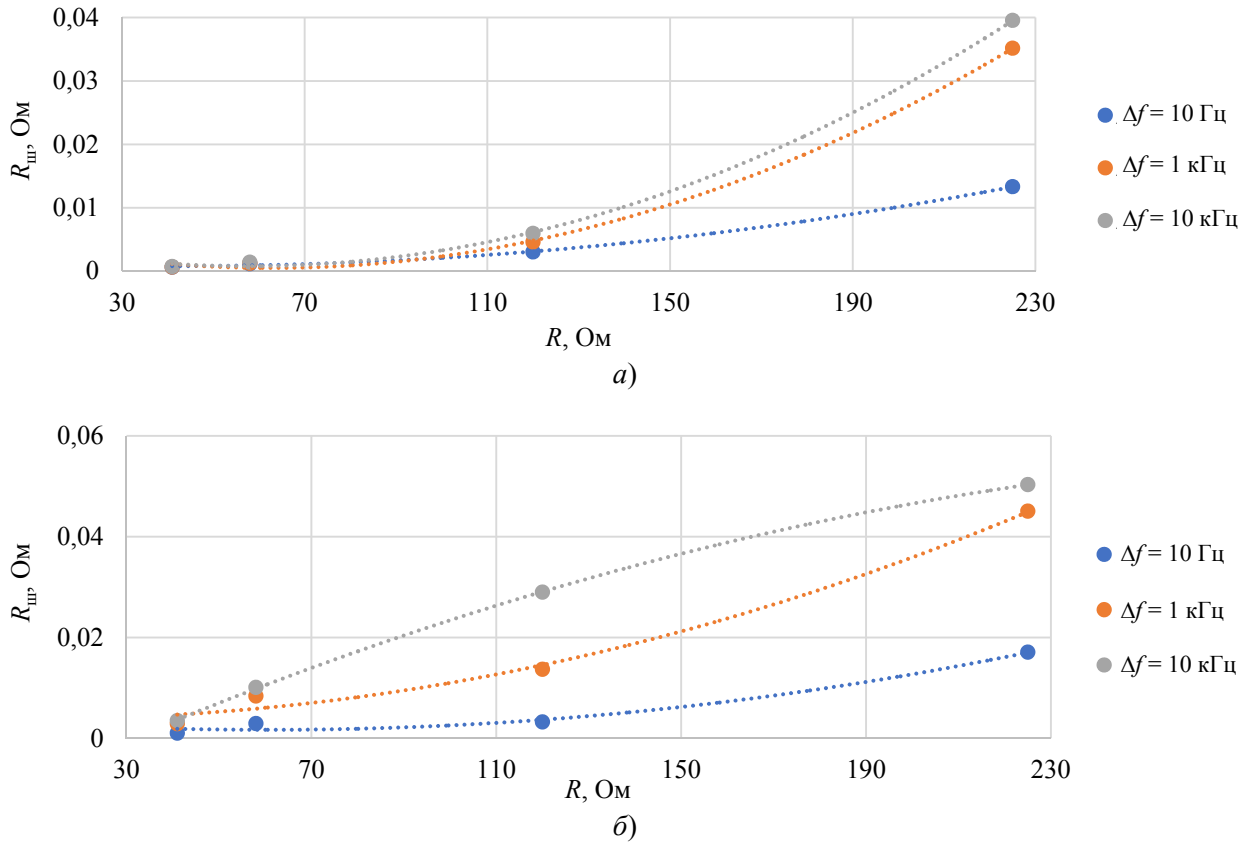

Рис. 3. Изменение среднеквадратичного значения флуктуации (шума) сопротивления от сопротивления образцов в полосе частот Δf = 10 Гц, Δf = 1 кГц и Δf = 10 кГц: а) при фиксированном напряжении 3,6 В; б) при фиксированном токе 7,8 мА

Заключение

Полученные спектральные характеристики мощности низкочастотного шума резистивных компонентов R_1–R_4 при постоянном уровне падения напряжения и тока показали увеличение эффективного напряжения низкочастотного шума при уменьшении ширины резистивной пленки. При этом уменьшение ширины приводит к росту флуктуации сопротивления низкочастотного шума от номинала резистивного компонента по квадратичному закону в независимости от уровня тока и напряжения на резисторе. Эффективное значение мощности низкочастотного шума, рассчитанное на основе спектральной характеристики, увеличивается при фиксированном токе и уменьшается при фиксированном напряжении по квадратичному закону в полосе частот Δf = 10 Гц, Δf = 1 кГц, Δf = 10 кГц.

На основе измеренных и рассчитанных характеристик, можно предположить, что при уменьшении геометрических размеров происходит изменение подвижности или концентрации носителей заряда. Это приводит к гипотезе, что при уменьшении геометрических размеров происходит изменение механизмов электропроводности. А измерение низкочастотного шума при различных режимах позволяет зафиксировать переход одного механизма электропроводности к другому, которое сопровождается увеличением или уменьшением амплитуды мощности низкочастотного шума. Для подтверждения данной гипотезы, в будущей работе, необходимо исследование механизмов электропроводности рассматриваемых структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FEWM-2025-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Труфанова Н. С., Рагимов Э. Р., Артищев С. А., Лощилов А. Г.* / Нанотехнологии: разработка, применение. 2022. № 4. С. 37–44.

2. *Булгаков О. М.* / Вестник Воронежского института МВД России. 2012. № 3. С. 177–145.

3. *Jia X., He L.* / AIP Advances. 2021. Vol. 11. № 4. P. 1–7.

4. *Demolder S., Vandendriessche M., Calster A. V.* / Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1980. Vol. 13. № 12. P. 1323–1327.

5. *Abe O., Taketa Y., Haradome M.* / Electrical Engineering in Japan. 1990. Vol. 110. № 1. P. 21–30.

6. *Chitale S. M., Vest R. W.* / IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1988. Vol. 11. № 4. P. 604–610.

7. *Matusiak T., Dabrowski A., Golonka L.* / Circuit World. 2021. Vol. 47. № 2. P. 138–145.

8. *Mercha A., Feyaerts R., Vandamme L. K. J.* / International Journal of Electronics. 2001. Vol. 88. № 3. P. 315–319.

9. *Kolek A., Stadler A. W., Zawiślak Z.* / Noise and Fluctuations: 20th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF-2009). 2009. Vol. 1129. № 1. C. 157–160.

10. *Dietrich S.* / 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology. – Brno, 2009. P. 1–6.

11. *Walter D., Bulau A., Zimmermann A.* / Sensors. 2023. Vol. 223. № 3. P. 1–29.

12. *Beev N.* / IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Ottawa, 2022. P. 1–6.

13. *Rocak D.* / Microelectronics Reliability. 2001. Vol. 41. № 4. P. 531–542.

14. *Якимов А. В.* Введение в физику шумов: учебное пособие. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2022.

15. *Сокуренко В. А., Сахаров Ю. В., Артищев С. А.* / Прикладная физика. 2024. № 3. С. 20–26.

PACS: 07.50.Hp

Study of the influence of the resistance value of thick-film resistive components on the power of low-frequency noise

V. A. Sokurenko*, Yu. V. Sakharov and S. A. Artishchev

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia
** E-mail: sokurenko.sl.08@mail.ru*

Received 14.01.2025; revised 4.03.2025; accepted 7.04.2025

The article presents the results of a study of the spectral characteristics of the low-frequency noise power from the resistance of resistors manufactured using thick-film technology by the printer printing method in two modes. The first, at a fixed voltage on the resistor U = 3.6 V and the second at a fixed current I = 7.8 mA. It is shown that with a decrease in the width of the resistive film, the resistance fluctuations and the mean square value of the low-frequency noise power change according to a quadratic law, based on the obtained characteristics of the spectral density of the low-frequency noise power. In this case, the mean square amplitude value of the noise power increases at a fixed current and decreases at a fixed voltage. From a scientific point of view, an important result has been obtained, which in the future can be used in the study of electrical conductivity mechanisms and the assessment of electrophysical parameters of resistive components, including the analysis of the reliability of resistive components based on low-frequency noise.

Keywords: low frequency noise; low frequency noise power; resistance fluctuations; carbon resistor; printer printing; thick film technology.

REFERENCES

1. Trufanova N. S., Ragimov E. R., Artishchev S. A. and Loshchilov A. G., Nanotechnology: development, application, № 4, 37–44 (2022) [in Russian].
2. Bulgakov O. M., Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, № 3, 177–145 (2012) [in Russian].

3. Jia X. and He L., AIP Advances **11** (4), 1–7 (2021).
4. Demolder S., Vandendriessche M. and Calster A. V., Journal of Physics E: Scientific Instruments **13** (22), 1323–1327 (1980).
5. Abe O., Taketa Y. and Haradome M., Electrical Engineering in Japan **110** (1), 21–30 (1990).
6. Chitale S. M. and Vest R. W., IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology **110** (4), 604–610 (1988).
7. Matusiak T., Dabrowski A. and Golonka L., Circuit World **47** (2), 138–145 (2021).
8. Mercha A., Feyaerts R. and Vandamme L. K. J., International Journal of Electronics **88** (3), 315–319 (2001).
9. Kolek A., Stadler A. W. and Zawiślak Z., Noise and Fluctuations: 20th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF-2009), **1129** (1), 157–160 (2009).
10. Dietrich S., 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, 1–6 (2009).
11. Walter D., Bulau A. and Zimmermann A., Sensors, **223** (3), 1–29 (2023).
12. Beev N., IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Ottawa, 2022, pp. 1–6.
13. Rocak D., Microelectronics Reliability **41** (4), 531–542 (2001).
14. Yakimov A. V. Introduction to noise physics: a tutorial. Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 2022 [in Russian].
15. Sokurenko V. A., Sakharov Yu. V. and Artishchev S. A., Applied Physics, № 3, 20–26 (2024) [in Russia].

Об авторах

Сокуренко Вячеслав Артурович, аспирант, младший научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, д. 40). E-mail: sokurenko.sl.08@mail.ru SPIN-код РИНЦ 9309-3041, Author ID 1273302

Сахаров Юрий Владимирович, профессор, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, д. 40). SPIN-код РИНЦ 1860-2935, Author ID 116404

Артищев Сергей Александрович, заведующий лабораторией, к.т.н., Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, д. 40). SPIN-код РИНЦ 4380-4616, Author ID 663759