

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.049

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВАРИАЦИИ АЛЛАНА
К ИЗУЧЕНИЮ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА
МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ КОНТАКТОВ****Д. С. Логинов**, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0003-0000-0411-7540, e-mail: skooobel@gmail.com

Т. А. Холомина, д. ф.-м. н., профессор кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-3902-618X, e-mail: marta.tap@yandex.ru

В. Г. Литвинов, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

А. В. Ксендзов, к.т.н., доцент кафедры РТУ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0009-0009-6253-3842, e-mail: xendzov.a.v@rsreu.ru

Представлены результаты применения метода вариации Аллана к изучению спектров низкочастотного шума низкоомных элементов электронной техники. Полученные в работе результаты позволяют утверждать, что в ограниченном диапазоне частот, который имеет место на практике, процесс генерации низкочастотного шума можно считать стационарным. Используя метод вариации Аллана в совокупности с преобразованием Фурье, можно получить дополнительную информацию об исследуемом объекте.

Показано, что экспресс-диагностика с использованием спектроскопии низкочастотного шума продолжительностью 3-5 минут позволяет получить сведения об исследуемом объекте с достоверностью не менее 90 % по сравнению с более длительной диагностикой.

Цель настоящей работы – исследование возможности применения метода вариации (отклонения) Аллана для выявления признаков стационарности процесса генерации низкочастотного шума низкоомных объектов электронной техники.

Ключевые слова: низкочастотный шум, вариация Аллана, измерительная установка, спектральная плотность мощности.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-85-170-177**Введение**

Несмотря на длительную историю изучения низкочастотных (НЧ) шумов в различных объектах, многие аспекты этой проблемы остаются предметами дискуссии, в частности вопрос о стационарности процесса генерации НЧ (фликкер) шума. Фликкер-шум является разновидностью электрических флуктуаций, спектральная плотность мощности которых при низких частотах f растёт с уменьшением частоты по закону, близкому к $1/f$. Особое значение шумовым измерениям на частотах ниже 1 Гц придает возможность обнаруживать дефекты или степень разупорядоченности как в материалах, так и в компонентах электронной техники с высокой чувствительностью, недоступной ни для стационарных электрических, ни для оптических методов.

В работе [1], например, указано, что уровень низкочастотного шума вида $1/f$, который определяется флуктуациями проводимости объекта, может изменяться на 5-6 порядков при практически неизменных значениях подвижности и концентрации носителей заряда в образце. Понимание физической природы процесса и изучение параметров спектров НЧ шума

позволяют применить его для экспресс-диагностики и прогнозирования ресурса работы электронных компонентов.

Методические аспекты и постановка задачи

В настоящее время порядок величины и частотная зависимость спектральной плотности мощности (СПМ) низкочастотного шума известны для многих материалов и приборов, однако проблема физического и математического описания природы НЧ шума окончательно не решена. Многочисленные теоретические модели, как правило, созданы для конкретных объектов. Одна из важных проблем – выяснение того, является ли процесс генерации НЧ шума стационарным либо нестационарным.

Большинство авторов, изучавших особенности НЧ шума (фликкер-шума) в различных объектах [2, 3], полагают, что указанный процесс является стационарным, поскольку в экспериментальных исследованиях никакого проявления нестационарности шума замечено не было. Букингом в [4] на основании теоремы Винера – Хинчина аналитически доказано, что в ограниченной полосе частот (которая имеется на практике) $1/f$ шум является статистически стационарным процессом. В книге [5] автор рассчитал дисперсию приращения относительных флуктуаций сопротивления объекта за время наблюдения τ . Обнаружено, что дисперсия D растет очень медленно: $D \approx 3 \cdot 10^{-9}$ при $\tau = 100$ с; $D \approx 5 \cdot 10^{-9}$ при $\tau = 10^6$ с (≈ 11 суток); $D \approx 6 \cdot 10^{-9}$ при $\tau = 10^8$ с (≈ 3 года); $D \approx 6,8 \cdot 10^{-9}$ при $\tau = 10^{10}$ с (≈ 320 лет). На основании проведенного анализа сделано заключение, что вопрос о стационарности фликкерного шума остается открытым.

Вариация Аллана – это метод анализа временных последовательностей массивов данных для выявления характеристик шумов в функции усредненного времени. В последние годы метод вариации Аллана в большинстве случаев применяется для оценки шумов нестабильности показаний разных датчиков [8-10]. Для определения вариации Аллана записывается выходной сигнал $S(t)$, включающий M отсчетов, а интервал между ними имеет длительность T_0 , таким образом, соответствующая длина записи равна MT_0 . Далее определяется массив, накопленный в результате интегрирования выходного сигнала $S(t)$ в течение m отсчетов:

$$y_m = \int_0^{mT_0} S(t) dt .$$

Вариация Аллана рассчитывается по формуле [10]:

$$\sigma^2(nT_0) = \frac{1}{2(M-2n)(nT_0)^2} \sum_{m=1}^{M-2n} (y_{m+2n} - 2y_{m+n} + y_m)^2 .$$

В ряде случаев вычисляется отклонение Аллана или корень квадратный из вариации Аллана (Root AVAR – девиация Аллана). При построении графической зависимости отклонения Аллана по оси абсцисс откладывается десятичный логарифм среднего времени $\tau = nT_0$, где T_0 – длительность каждого из M отсчетов выходного сигнала, $n = 1, 2, 3, \dots, n_{max} \leq (M-1)/2$. По оси ординат отображается десятичный логарифм отклонения Аллана. Далее осуществляется анализ наклонов различных участков кривой отклонения Аллана, по которым судят о наличии возможных составляющих сигнала. Характер таких зависимостей аналогичен для всех случайных процессов, включающих ряд типовых составляющих [8-10]. На рисунке 1 приведен график отклонений Аллана, на котором по виду зависимости можно выделить отдельные характерные компоненты шума [8].

Основной целью настоящей работы явилось изучение возможности применения метода дисперсии (вариации) Аллана к исследованию НЧ шума низкоомных элементов электроники и выявление условий, при которых в целом, как нам удалось установить, нестационарный случайный процесс генерации шума проявляет свойства стационарного, так как в измеренном сигнале в ограниченном диапазоне частот присутствует стационарный участок фликкер-шума.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать алгоритм и программу, с помощью которой провести обработку массивов данных по изучению спектров НЧ шума магнитоуправляемых контактов, выяснить влияние разницы показателей вариации Аллана (Root AVAR – девиация Аллана) на параметры спектра НЧ шума и зависимости Root AVAR от времени эксперимента при обработке массивов данных. Ранее, насколько нам известно, подобных исследований не проводилось. Отметим, что при исследовании герметизированных металлических контактов методами шумовой спектроскопии величина контактного сопротивления являлась определяющей в результирующей спектральной плотности мощности НЧ шума S как случайного процесса, описываемого зависимостью $S \sim 1/f^\beta$, где f – частота, β – показатель формы спектра [6, 7]. Это свидетельствует о зависимости спектральной плотности мощности от дефектности материала контакта [7].

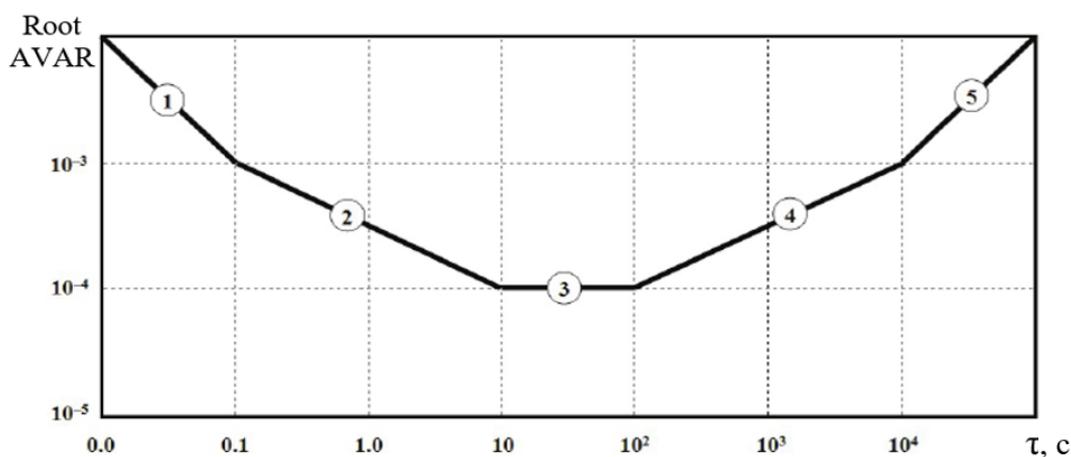


Рисунок 1 – Зависимости дисперсии Аллана (в логарифмическом масштабе) для типовых составляющих: 1 – шум квантования; 2 – белый шум; 3 – фликкер-шум; 4 – винеровский процесс; 5 – линейный дрейф [8]
Figure 1 – Graphs of Allan deviations (on a logarithmic scale) for typical components: 1 – quantization noise; 2 - white noise; 3 – flicker noise; 4 - Wiener process; 5 - linear drift [8]

Результаты эксперимента

Для изучения возможности применения вариации (отклонения) Аллана был проведен эксперимент с измерением спектров НЧ шума низкоомных элементов электронной техники – партии из 10 магнитоуправляемых контактов (герконов) марки МКА-14103 с низким и высоким разрешением, длительностью 3 и 25 минут соответственно. Измерение проводилось с помощью разработанного измерительно-аналитического комплекса [11].

После проведения анализа Фурье над полученным сигналом были получены спектры, представленные на рисунках 2 и 3. На рисунке 2 в качестве примера представлен спектр НЧ шума герконового контакта с высоким разрешением измерения, длительностью 25 минут, а на рисунке 3 – спектр НЧ шума этого же контакта с низким разрешением измерения, длительностью 3 минуты.

При решении задачи о возможности построения вариации (отклонения) Аллана для исследованных образцов использованы результаты проведенного аналитического обзора опубликованных работ. Например, целью работы [9] являлась фильтрация от различных типов шумовых составляющих полезной информации, полученной на выходе инерциальной навигационной системы. Для оценки и выявления природы шумов показаний датчиков инерциальной навигационной системы авторами [9] использован метод дисперсии (вариации) Аллана – выделение отдельных составляющих шума измерений.

На основе анализа метода вариаций Аллана [8-10] была разработана программа в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 4, и построены графические зависимости

отклонения Аллана для каждого экспериментально полученного спектра НЧ шума исследованных низкоомных коммутационных элементов.

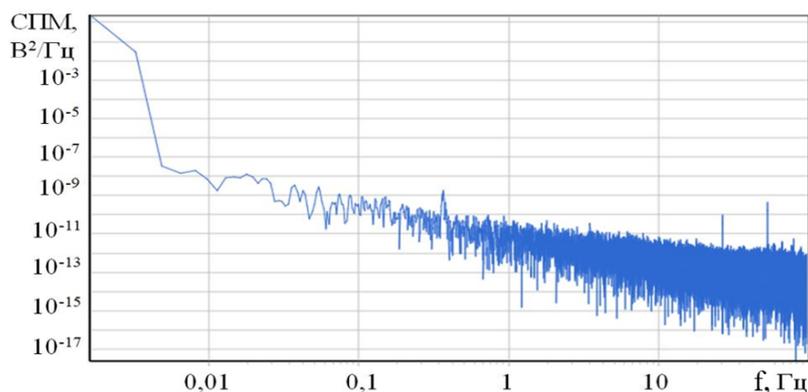


Рисунок 2 – Спектр НЧ шума геркона, измеренный с высоким разрешением
Figure 2 – LF noise spectrum of reed switch, measured with high resolution

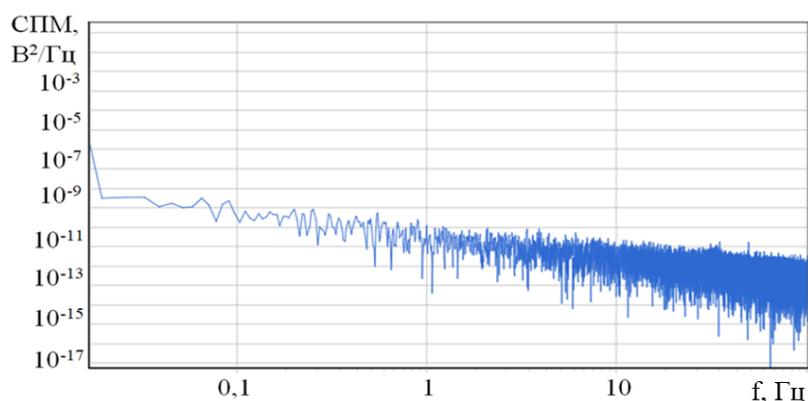


Рисунок 3 – Спектр НЧ шума геркона, измеренный с низким разрешением
Figure 3 – LF noise spectrum of reed switch, measured with low resolution

Графические зависимости, иллюстрирующие вариации Аллана, полученные с помощью разработанной программы по алгоритму, приведенному на рисунке 4, представлены на рисунках 5 и 6. Эти зависимости построены для спектров, показанных на рисунках 2 и 3. Из результатов, приведенных на рисунках 5 и 6, следует, что в определенном диапазоне времен, где отклонение Аллана не зависит от времени, нестационарный в целом процесс является стационарным.

Анализ данных, приведенных на рисунках 5 и 6, свидетельствует о том, что характер зависимостей вариации Аллана подобен для спектров НЧ шума, измеренных с высоким и низким разрешением. Полученные результаты аналогичны для всех исследованных образцов. На спектрах НЧ шума всех образцов прослеживаются два характерных участка с разным наклоном. Для экспериментальных спектров НЧ шума проведена аппроксимация необходимых для получения коэффициента β участков методом линейной регрессии [12]. После проведения аппроксимации для сравнения вычислен угол наклона аппроксимирующих прямых и получен коэффициент β зависимости $1/f^\beta$ (рисунки 7 и 8).

Результаты, приведенные на рисунках 7 и 8, свидетельствуют о том, что углы наклона и коэффициенты β близки по величине для спектров НЧ шума, измеренных с низким и высоким разрешением. Расчеты показали, что для спектра с низким разрешением угол между аппроксимирующими прямыми равен 58 градусам, для спектра с высоким разрешением – 56 градусам. Коэффициент наклона β для спектра с низким разрешением равен 1,94, а для спектра с высоким разрешением – 2,06.

Таким образом, можно сделать вывод, что данные экспресс-диагностики низкоомных элементов электроники методом спектроскопии НЧ шума длительностью менее 5 минут (с низким разрешением) с последующей обработкой результатов с помощью вариации Аллана и анализа Фурье [1-6] более чем на 90 % совпадают с результатами более длительной диагностики с высоким разрешением.

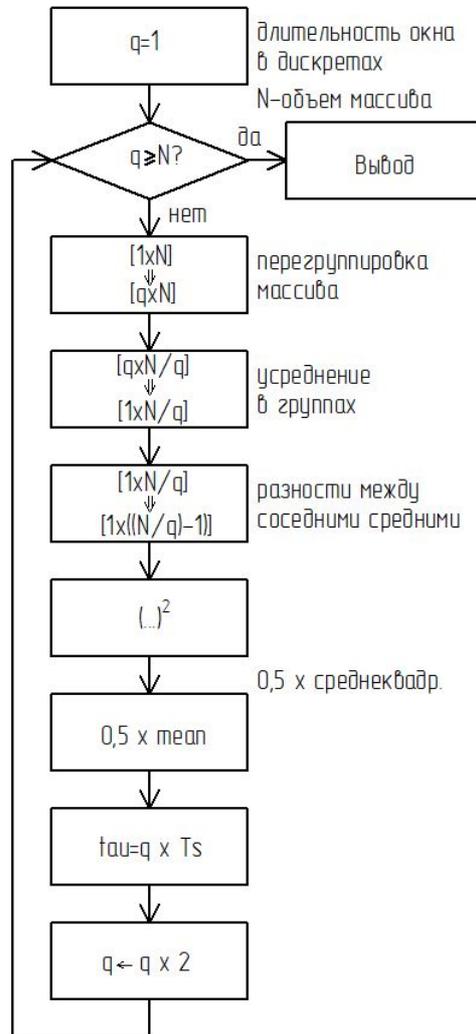


Рисунок 4 – Алгоритм построения отклонения Аллана
 Figure 4 – Algorithm for constructing Allan variation

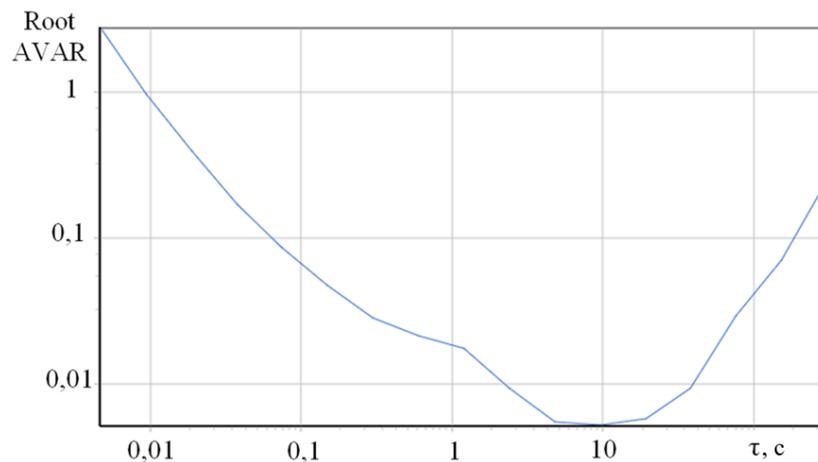


Рисунок 5 – График отклонения Аллана для спектра НЧ шума с высоким разрешением
 Figure 5 – Allan Variation for High Resolution Spectrum LF noise

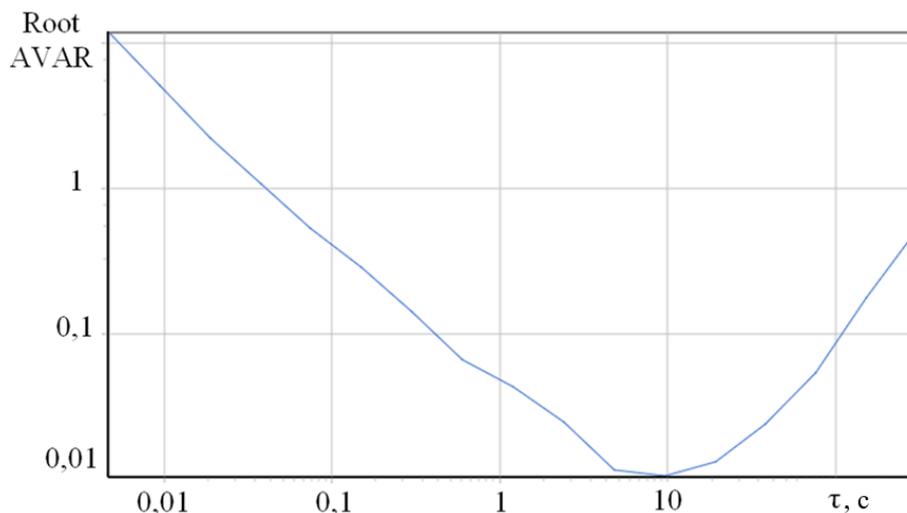


Рисунок 6 – График отклонения Аллана для спектра НЧ шума с низким разрешением
 Figure 6 – Allan Variation for Low Resolution Spectrum LF noise

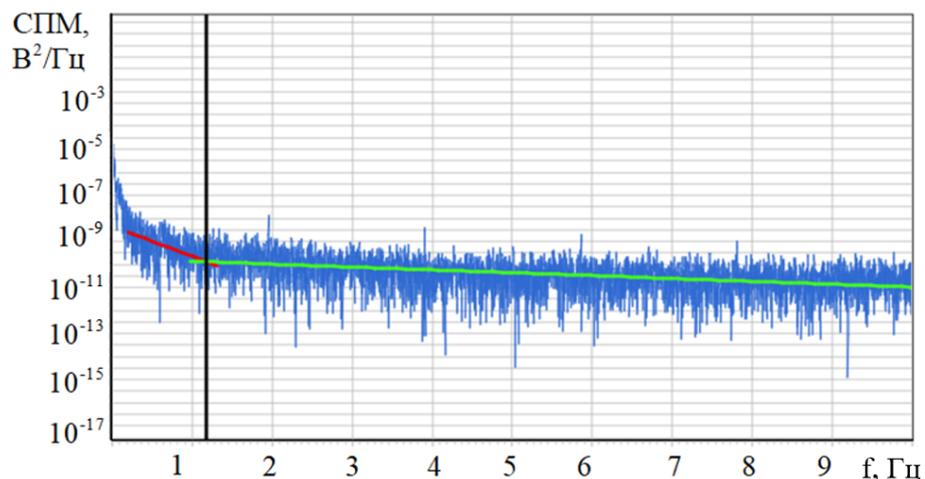


Рисунок 7 – Аппроксимация спектра с высоким разрешением
 Figure 7 – High Resolution Spectrum Fitting

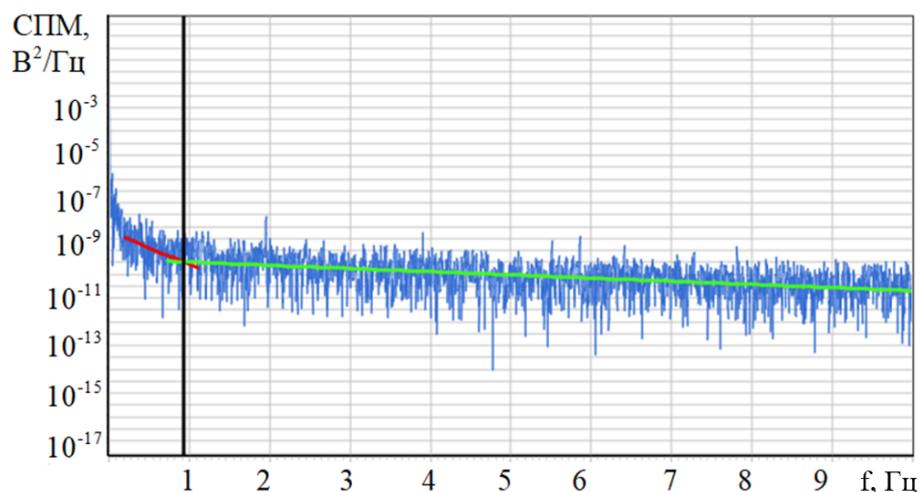


Рисунок 8 – Аппроксимация спектра с низким разрешением
 Figure 8 – Low Resolution Spectrum Fitting

Заключение

В работе впервые применен метод вариаций Аллана к обработке спектров НЧ шума низкоомных элементов электронной техники – магнитоуправляемых контактов. На основе раз-

работанных алгоритма и программы получены зависимости дисперсии Аллана, характеризующиеся наличием типовых составляющих: шумов квантования, белого и фликкер-шума, а также винеровского процесса и линейного дрейфа.

Установлено, что по наклону зависимости дисперсии Аллана можно определить характер шума конкретного объекта (рисунок 1) и выделить необходимый интервал для более детального исследования стационарной области экспериментального спектра НЧ шума. Ранее полученные нами результаты позволяют утверждать, что природа процесса генерации НЧ шума магнитоуправляемых контактов обусловлена дефектами структуры, возникающими в результате коммутации. При использовании метода вариации Аллана в совокупности с преобразованием Фурье существует перспектива получения дополнительной информации об исследуемом объекте, что может явиться задачей дальнейших исследований.

Полученные в работе результаты позволяют утверждать, что в ограниченном диапазоне частот, который имеет место на практике, существует стационарная область, которая однозначно проявляется на всех зависимостях дисперсии Аллана, построенных на основе экспериментальных данных, приведенных, например, на рисунках 5 и 6. Это означает, что процесс генерации НЧ шума магнитоуправляемых контактов можно считать стационарным с возможностью применения соответствующих методов обработки результатов.

Экспресс-диагностика при помощи НЧ шумовой спектроскопии продолжительностью менее 5 минут, позволяет получить данные об исследуемом объекте, которые не менее чем на 90% совпадают с полученными при длительной диагностике. Благодаря применению экспресс-диагностики, можно проводить быструю отбраковку изделий на производстве и оценивать качество выпускаемой продукции.

Библиографический список

1. **Разуменко Д.** Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. 2008. № 9. С.168-176.
2. **Якубович Б. И.** О природе избыточного низкочастотного шума (обзор) // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 127-138.
3. **Hooge F.N.** $1/f$ Noise Sources // IEEE Transactions on Electron Devices. 1994. Vol. 41. No. 11. Pp.1926-1935.
4. **Букингом М.** Шумы в электронных приборах и схемах: пер. с англ. Мир, 1986. 398 с.
5. **Якимов А.В.** Физика шумов и флуктуаций параметров: электронное учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. 85 с.
6. **Жигальский Г. П.** Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 512 с.
7. **Логинов Д. С., Литвинов В. Г., Холомина Т. А., Семенов А. Р., Рыбин Н. Б.** Исследование шумовых характеристик герметизированных магнитоуправляемых контактов // Радиотехника. Т. 83, 2019. № 11(18). С. 64-70.
8. **Сирая Т. Н.** Статическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств // Гирокоспия и навигация. Том 28. № 1. 2020. С. 3-18.
9. **Лесников М. В., Ксендзов А. В.** Способы вычисления дисперсии Аллана на примере датчика ADIS16407 // Молодой ученый. 2021. № 23 (365). С. 97-100.
10. **Матвеев В. В., Погорелов М. Г.** Анализ погрешностей микромеханических гирокоспов методом вариаций Аллана // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып.3. С. 123-135.
11. **Логинов Д. С., Холомина Т. А., Литвинов В. Г.** Измерительно-аналитический комплекс для автоматизированных испытаний магнитоуправляемых контактов // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 3. С. 134-140.
12. **Логинов Д. С., Холомина Т. А., Шерова И. Ф.** Исследование влияния условий коммутации на измерение спектра низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 228-236.

UDC 621.382.049

APPLICATION OF THE ALLAN VARIATION METHOD TO STUDY LOW-FREQUENCY NOISE MAGNETICALLY CONTROLLED CONTACTS

D. S. Loginov, post-graduate student, Micro- and Nanoelectronics Department, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0003-0000-0411-7540, e-mail: skooobel@gmail.com

T. A. Kholomina, Dr. Sc. (Phys. and Math.), professor, Micro- and Nanoelectronics Department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-3902-618X, e-mail: marta.tap@yandex.ru

V. G. Litvinov, Dr. Sc. (Phys. and Math.), Head of the Department, Micro- and Nanoelectronics Department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

A. V. Xendzov, Ph.D. (Tech.), associate professor, Radio Engineering Devices Department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0009-6253-3842, e-mail: xendzov.a.v@rsreu.ru

*The results of applying Allan variation method to the study of low-frequency noise spectra of low-impedance electronic equipment objects are presented. The results obtained in the work allow us to assert that in a limited frequency range, which takes place in practice, the process of generating low-frequency noise can be considered stationary with the possibility of applying appropriate methods of processing the results. Using Allan variation method in conjunction with the Fourier transform, it is possible to obtain more complete information about the object under study. It is shown that rapid diagnostics using low-frequency noise spectroscopy with a duration of less than 5 minutes allows obtaining information about the object under study with the reliability of at least 90 % compared to longer diagnostics. **The aim of this work** is to apply Allan variation (deviation) method to the study of low-frequency noise spectra of low-resistance electronic equipment objects and to identify the conditions under which noise exhibits the properties of random stationary process.*

Keywords: low-frequency noise, Allan variation, measuring unit, spectral power density.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-85-170-177

References

1. **Razumenko D.** Nizkochastotnye shumy jelektronnyh komponentov kak instrument dlja diagno-stiki vnutrennih defektov. *Komponenty i tehnologii*. 2008, no. 6, pp. 168-174 (in Russian).
2. **Yakubovich B. I.** O prirode izbitochnogo nizkochastotnogo shuma (obzor). *Uspekhi prikladnoi fiziki*. 2016, vol. 4, no. 2, pp. 127-138. (in Russian).
3. **Hooge F. N.** 1/f Noise Sources. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1994, vol. 41, no. 11, pp.1926-1935.
4. **Bukingem M.** *Shumy v jelektronnyh priborah I sshemash*. Per. s angl. Mir, 1986. 398 p. (in Russian)
5. **Yakimov A. V.** *Fizika шумов i fluktuacii parametrov*. Elektronnoe uchebnoe posobie. Nizhnii Novgorod. Nizhgorodskii universitet. 2013. 85p. (in Russian)
6. **Zhigal'skij G. P.** *Fluktuacii i shumy v jelektronnyh tverdotel'nyh priborah*. Moscow: FIZ-MATLIT, 2012, 512 p. (in Russian).
7. **Loginov D. S., Litvinov V. G., Kholomina T. A., Semenov A. R., Rybin N. B.** Issledovanie shumovyh karakteristik germetizirovannyh magnitoupravlyaemyh kontaktov. *Radiotekhnika*. 2019, vol. 83, no. 11(18), pp. 64-70. (in Russian).
8. **Siraja T. N.** Statisticheskaja interpretatsija variatsii Allana kak kharakteristika izmeritel'nykh I navigatsionnykh usroistv. *Giroskopija i navigatsija*. 2020, vol. 28, no. 1, pp. 3-18. (in Russian).
9. **Lesnikov M. V., Xendzov A. V.** Sposobi vichislenija dispersii Allana na primere datchika ADIS16407. *Molodoy uchenii*. 2021, no. 23 (365), pp. 97-100. (in Russian).
10. **Matveev V. V., Pogorelov M. G.** Analiz pogreshnostei mikromekhanicheskikh giroskopov metodom variatsii Allana. *Izvestija Tul.GU. Technicheskije nauki*. 2015, vol. 3, pp. 123-135. (in Russian).
11. **Loginov D. S., Kholomina T. A., Litvinov V. G.** Izmeritel'no-analiticheskij kompleks dlja avtomatizirovannyh ispytaniy magnitoupravlyaemyh kontaktov. *Radiotekhnika*. 2022, vol. 86, no. 3, pp. 134-140 (in Russian).
12. **Loginov D. S., Kholomina T. A., Sherova I. F.** Issledovanie vlijanija uslovii kommutatsii na izmenenie spectra nizkochastotnogo shuma magnitoupravlyaemyh kontaktov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 82, pp. 228-236. (in Russian).