

УДК 53.084.6; 53.084.872-876

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ КОММУТАЦИИ НА ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА 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

**И. Ф. Шерова**, магистрант РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0002-6515-8939, e-mail: sherova.ira@mail.ru

*Представлены результаты экспериментального исследования влияния условий коммутации: величины токов и источников магнитного поля устройства, предназначенного для замыкания контактов, на характеристики магнитоуправляемых контактов. Для определения необходимых параметров использованы передаточные характеристики, полученные при включении исследуемого герконового контакта по схеме классического четырехполюсника.*

*Проведен анализ совокупности условий эксперимента, определяющих величину и разброс значений контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов при многократной повторной коммутации, а также влияния источников магнитного поля устройства, предназначенного для замыкания, на воспроизводимость параметров, рассчитанных по разработанной программе: показателя формы спектра и спектральную плотность мощности НЧ шума. Выявлены условия эксперимента, при которых достигается максимальная воспроизводимость результатов.*

*Целью настоящей работы является изучение факторов, влияющих на разброс величины контактного сопротивления и параметры спектров НЧ шума магнитоуправляемых контактов при их многократной повторной коммутации с помощью магнитного поля от разных источников.*

*Ключевые слова:* НЧ шум, магнитоуправляемые контакты, измерительная установка, сопротивление контакта, спектральная плотность мощности.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2022-82-228-236

### Введение

В качестве коммутационных устройств радиоэлектронной аппаратуры часто применяются магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы), которые обеспечивают электрическое соединение компонентов. Контакты геркона, изготовленные из сильномагнитных сплавов, замыкаются в магнитном поле при помощи устройства для коммутации. Для обеспечения стабильной работы герконов ранее нами был предложен метод прогнозирования их надежности по результатам измерения спектральной плотности мощности (СПМ, PSD – power spectral density) низкочастотного (НЧ) шума с помощью разработанного измерительно-аналитического комплекса [1-3].

Несмотря на ряд опубликованных работ, посвященных изучению природы и применению для прогнозирования надежности электронных компонентов НЧ шумов [4, 5], многие технические проблемы реализации экспериментальных установок в настоящее время не решены.

Среди нерешенных общих проблем можно назвать главную – получение максимально воспроизводимых результатов, которое может быть обеспечено более совершенным экранированием экспериментальной установки, применением современных малошумящих компонентов элементной базы. Кроме того, в настоящее время отсутствуют однозначные схемотехнические решения создания экспериментальных установок для измерения спектров электрических шумов на частотах ниже 0,5 Гц, каждое решение имеет определенные недостатки.

### Постановка задач исследования

Основной целью настоящей работы явилось выявление и исследование факторов, влияющих на воспроизводимость результатов измерения характеристик НЧ шума магнитоуправляемых контактов при их многократной коммутации (замыкании) с помощью магнитного поля от разных источников.

При исследовании герметизированных металлических контактов методами шумовой спектроскопии очень важно знать контактное сопротивление, являющееся важнейшей характеристикой их качества, для получения корректных статистических данных и отбраковки герконов. Кроме того, поскольку природа НЧ шума связана с протеканием тока через объект [6,7], величина контактного сопротивления является определяющей в результирующей СПМ НЧ шума  $S$  как стационарного случайного процесса, описываемого зависимостью  $S \sim 1/f^\beta$ , где  $f$  – частота,  $\beta$  – показатель формы спектра.

Одной из задач настоящей работы явилось определение девиации (разброса) контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов при многократной коммутации. С этой целью при включении геркона по схеме классического четырехполюсника изучалась статистика изменений значения выходного напряжения четырехполюсника при постоянном входном и разных токах, проходящих через герконы. Далее будем называть указанную зависимость передаточной характеристикой. Замыкание магнитоуправляемых контактов проводилось с помощью специально разработанного устройства, предназначенного для коммутации.

### Результаты эксперимента

В работе исследована партия из 15 герконов МКА-14103, предназначенных для коммутации цепей постоянного и переменного токов.

Паспортные характеристики герконов:

МДС (магнитодвижущая сила) срабатывания, А, гр. А, Б – 8...23, 20...35.

МДС отпускания, А, не менее – 4.

Коэффициент возврата – 0,35...0,9.

Сопротивление контакта, Ом, не более – 0,1.

Время срабатывания, мс, не более – 1.

Время отпускания, мс, не более – 0,4.

Емкость, пФ, не более – 0,7.

Частота коммутации, Гц, не более – 100.

Наработка в зависимости от режима срабатывания –  $10^5 \dots 10^8$ .

Прямое измерение контактного сопротивления геркона в холостом режиме без протекания тока через него не имеет практического значения, поэтому необходимо измерение в рабочем режиме, т. е. в замкнутом состоянии при протекании тока через геркон.

Применение постоянного магнита, изготовленного из магнитотвердого материала, вместо катушки индуктивности в составе устройства для замыкания контактов облегчает процесс коммутации и эксперимента из-за отсутствия необходимости подачи сигнала от источника питания на катушку индуктивности. В предварительных опытах было обнаружено, что при использовании в качестве источника магнитного поля коммутирующего устройства неодимового магнита или бариевого феррита с одинаковыми параметрами при каждой последующей коммутации появлялся разброс сопротивления контакта и различия в параметрах повторно измеренных спектров НЧ шума. Указанное, по-видимому, возникает из-за особенностей распределения линий магнитного поля, которое замыкает контакты геркона. Использование электромагнитной катушки для замыкания контактов геркона позволяло достичь максимальной идентичности параметров эксперимента.

Передаточные характеристики герконов измерялись в двух режимах по схеме, представленной на рисунке 1. Условия эксперимента выбраны с учетом реальных условий работы магнитоуправляемых контактов. Изменение сопротивления выходного резистора при посто-

янном входном напряжении 8 В обеспечивало два режима измерения – при токах 0,1 А и 0,2 А. Устройство для замыкания контактов содержало катушку индуктивностью 10 мГн.

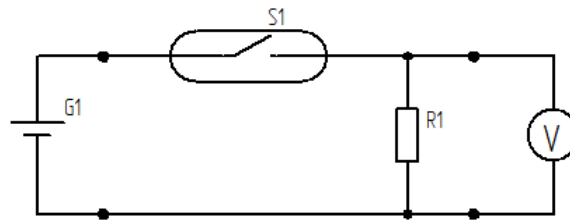


Рисунок 1 – Схема измерения в виде четырехполюсника  
Figure 1 – Measurement diagram in the form of a four-poler

Выходное напряжение на каждом образце, включенном по схеме четырехполюсника, измеряли по 10 раз в каждом режиме. На основе исходных данных для каждого образца построены следующие характеристики:

- 1) максимальные и минимальные значения выходных напряжений;
- 2) разности входного напряжения и максимальных значений выходных напряжений;
- 3) разности входного напряжения и минимальных значений выходных напряжений;
- 4) разности входного и выходных напряжений;
- 5) диапазон расхождения входного и выходных напряжений;
- 6) девиация сопротивлений герконов в разных режимах.

Обработка измеренных значений выходных напряжений производилась в среде MathCad. Для сглаживания графиков зависимостей использовалась регрессия линейной комбинацией функций скалярного аргумента (*linfit*). Комбинация функций выглядит следующим образом:

$$F(z) = \begin{pmatrix} \frac{1}{z+0,1} \\ z^2 \\ e^z \end{pmatrix},$$

где  $z$  – вектор действительных данных аргумента, элементы которого расположены в порядке возрастания. В данной работе в зависимости от характеристики в качестве  $z$  использовались:  $N$  – номер геркона и  $n$  – число измерений.

По результатам десяти измерений выходного напряжения каждого геркона, включенного по схеме четырехполюсника, были выявлены максимальные значения, наиболее приближенные к значению входного напряжения, и построены характеристики (рисунок 2). Из графика видно, что при токе  $I_1 = 0,1$  А у всех герконов максимальные значения выходного напряжения более стабильны, чем при токе  $I_2 = 0,2$  А. При  $I_2$  данная характеристика имеет больший разброс значений. Кроме того, при большем токе максимальные значения выходного напряжения геркона, включенного по схеме четырехполюсника, имеют меньшие величины. Из этого следует вывод, что чем меньше протекающий ток, тем максимальные значения при 10 измерениях выходного напряжения наиболее близки к значению входного напряжения геркона, включенного по схеме четырехполюсника [8, 9].

Аналогичные выводы можно сделать по характеристике минимальных выходных значений напряжений каждого геркона, включенного по схеме четырехполюсника. То есть и максимальные, и минимальные значения выходных напряжений имеют большее значение при токе 0,1 А.

Помимо этого, в результате измерений выявлено, что зависимости разности входного и выходных напряжений от числа измерений имеют большой разброс значений (до 21%). Плавно изменяющиеся характеристики имел геркон 15 (рисунок 3). Из данных рисунка 3 следует, что обе зависимости идут на спад, то есть при разных измерениях разность между входным и выходным напряжениями уменьшается за счет увеличения выходного напряжения. Это значит, что от того, каким образом распределены линии магнитного поля относительно образца при замыкании, зависит сопротивление образца. Из графика на рисунке 3 следует, что разности значений входного и выходных напряжений при токе 0,1 А имеют меньшее значение, чем при токе 0,2 А.

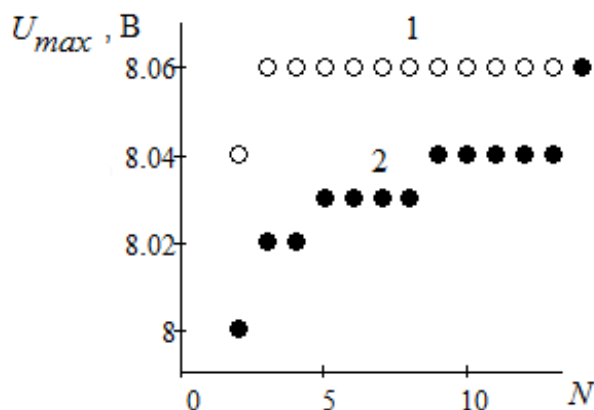


Рисунок 2 – Максимальные значения выходных напряжений каждого геркона, включенного по схеме четырехполюсника: 1 – при токе 0,1 А, 2 – при токе 0,2 А  
 Figure 2 – Maximum values of output voltages of each reed switch included according to a four – pole circuit: 1 – at a current of 0,1 А, 2 – at a current of 0,2 А

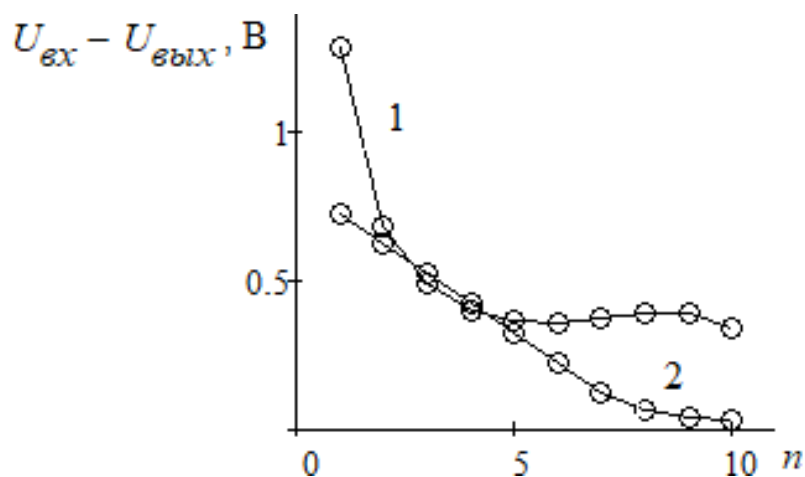


Рисунок 3 – Зависимость разности входного и выходных напряжений от числа измерений n для геркона 15: 1 – при токе 0,2 А, 2 – при токе 0,1 А  
 Figure 3– Dependence of input and output voltage difference on the number of measurements n for reed switch 15: 1 – at a current of 0,2 А, 2 – at a current of 0,1 А

При анализе значения диапазона расхождения входного и выходных напряжений каждого геркона, включенного по схеме четырехполюсника (рисунок 4), выявлено следующее: при токе 0,2 А разница между входным и выходным напряжениями имеет большую величину, чем при токе 0,1 А. При токе 0,1 А разница находится в пределах 0,12 В, при токе 0,2 А – 0,26 В.

В итоге была построена характеристика разброса сопротивления каждого геркона в двух режимах (рисунок 5).

Результаты показали, что при токе 0,1 А разброс сопротивлений на большинстве герконов находился в пределах от 0,1 Ом до 6,9 Ом, а при токе 0,2 А – от 0,3 до 4,95 Ом.

Экспериментальные исследования НЧ шума показали, что при измерении спектров одного и того же магнитоуправляемого контакта полученные характеристики значительно зависели от источника магнитного поля, применяемого в устройстве для замыкания контактов: бариевого феррита, неодимового магнита или катушки с индуктивностью 10 мГн.

На рисунке 6 представлены результаты двух измерений спектров НЧ шума одного из образцов исследованной партии, которые проведены в равных условиях при использовании бариевого феррита в качестве источника магнитного поля, применяемого в устройстве для замыкания контактов.

Для обработки спектров НЧ шума разработана специальная программа, позволяющая аппроксимировать характерные участки зависимости до и после точки (частоты) перегиба (из-

менения угла наклона аппроксимирующих прямых) с вычислением параметров – соответствующих показателей формы спектра  $\beta$  (рисунок 7). Результаты расчетов представлены в таблице 1.

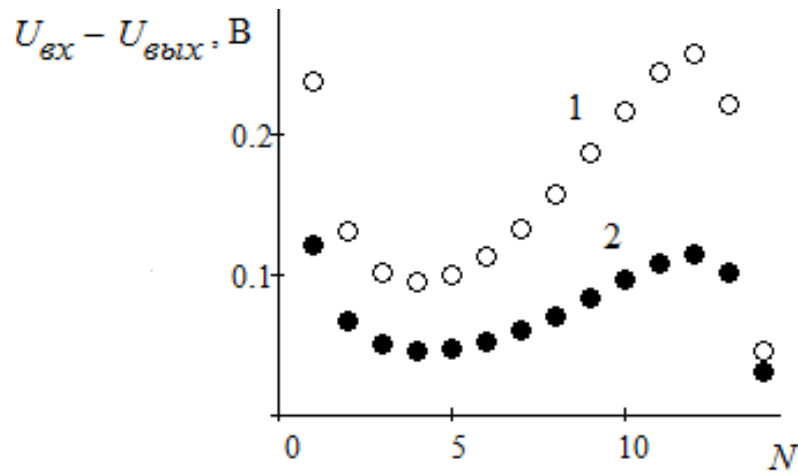


Рисунок 4 – Значение диапазона расхождения входного и выходных напряжений каждого геркона, включенного по схеме четырехполюсника: 1 – при токе 0,2 А, 2 – при токе 0,1 А  
Figure 4 – The value of divergence range of input and output voltages for each reed switch included according to a four - pole circuit: 1 – at a current of 0,2 A, 2 – at a current of 0,1 A

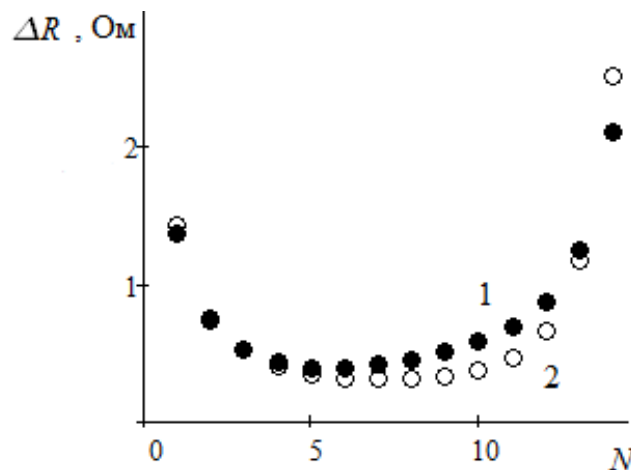


Рисунок 5 – Разброс значений сопротивлений каждого геркона:  
1 – при токе 0,2 А, 2 – при токе 0,1 А  
Figure 5 – The spread of resistance values of each reed switch:  
1 – at a current of 0,2 A, 2 – at a current of 0,1 A

Таблица 1 – Параметры спектров НЧ шума при повторных коммутациях магнитоуправляемого контакта (образец 12)

Table 1 – Parameters of LF noise spectra during repeated switching of magnetically controlled contact (sample 12)

Источник магнитного поля коммутирующего устройства	Частота перегиба, Гц	Показатель формы спектра $\beta$	СПМ, В <sup>2</sup> /Гц на частоте 0,01 Гц	СПМ, В <sup>2</sup> /Гц на частоте 0,1 Гц
Бариевый феррит	1,06	3,12	$9 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-11}$
		2,76	$8 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-12}$
Ниодимовый магнит	0,99	3,10	$10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-13}$
		2,97	$4 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-13}$
Катушка индуктивности 220 мГн	0,95	3,07	$6 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-13}$
		3,02	$7 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-13}$

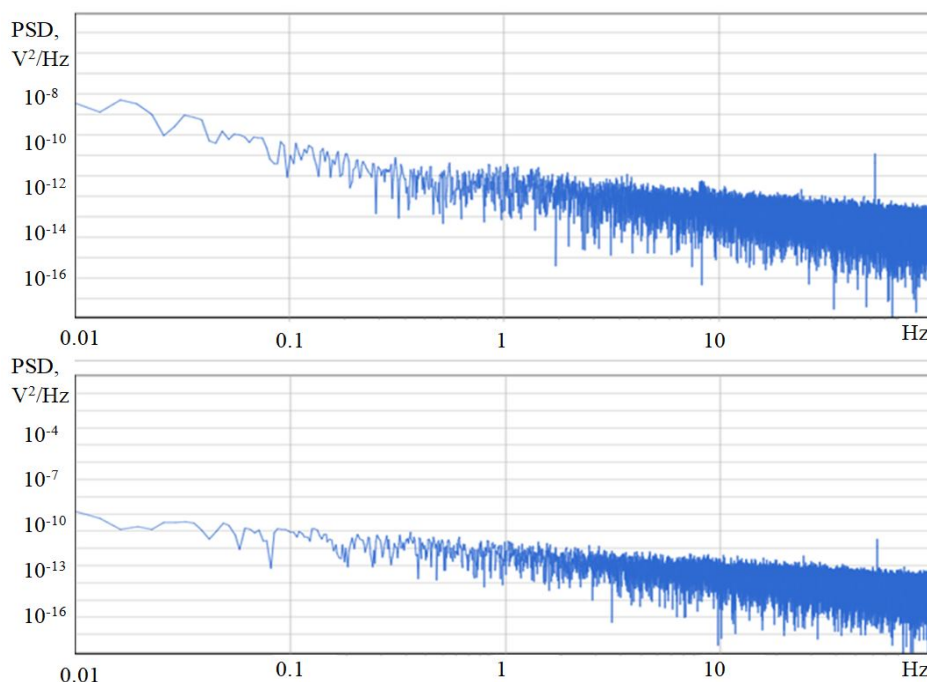


Рисунок 6 – Спектры НЧ шума образца 12, полученные с использованием бариевого феррита  
 Figure 6 – LF noise spectra of sample 12 obtained using a barium ferrite

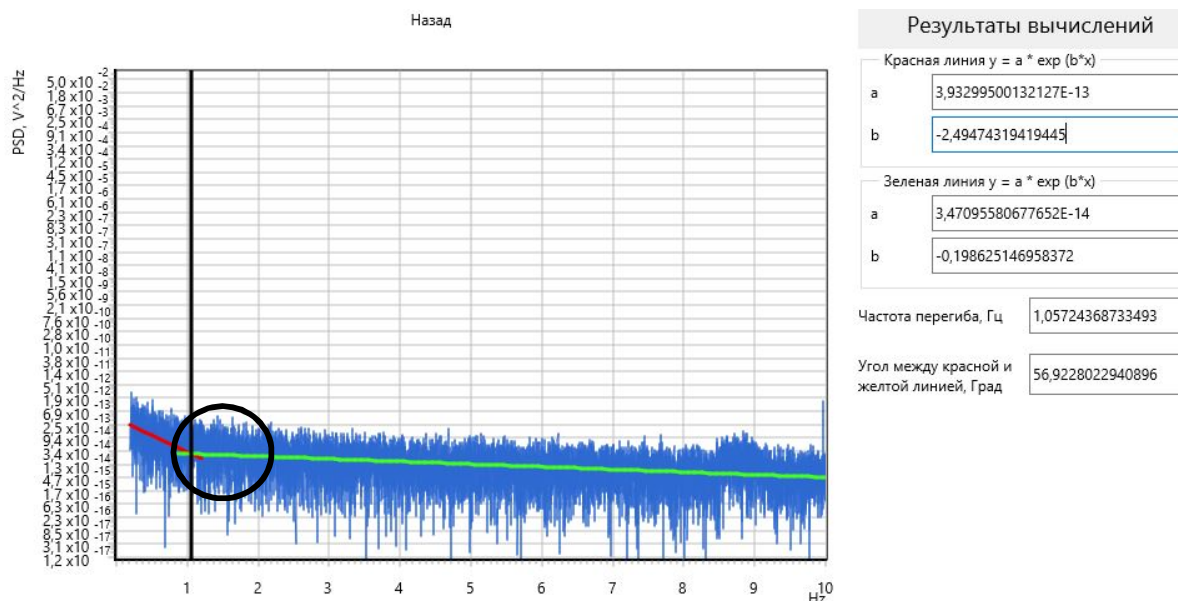


Рисунок 7 – Пример обработки спектра и расчета параметров  
 Figure 7 - Example of spectrum processing and parameter calculation

На рисунке 8 представлены результаты двух измерений спектров НЧ шума того же образца исследованной партии, которые проведены в равных условиях при использовании неодимового магнита в качестве источника магнитного поля, применяемого в устройстве для замыкания контактов геркона, при этом значения параметров спектров отличаются меньше, чем для случая применения бариевого феррита.

Измерения спектров НЧ шума, результаты которых представлены на рисунке 9, проведены дважды в равных условиях на том же образце при использовании электромагнитной катушки, которая обычно используется в нашей установке при исследовании магнитоуправляемых контактов [10]. Анализ спектров, приведенных на рисунке 9, показал, что параметры спектров отличаются минимально, зависимости практически идентичны.

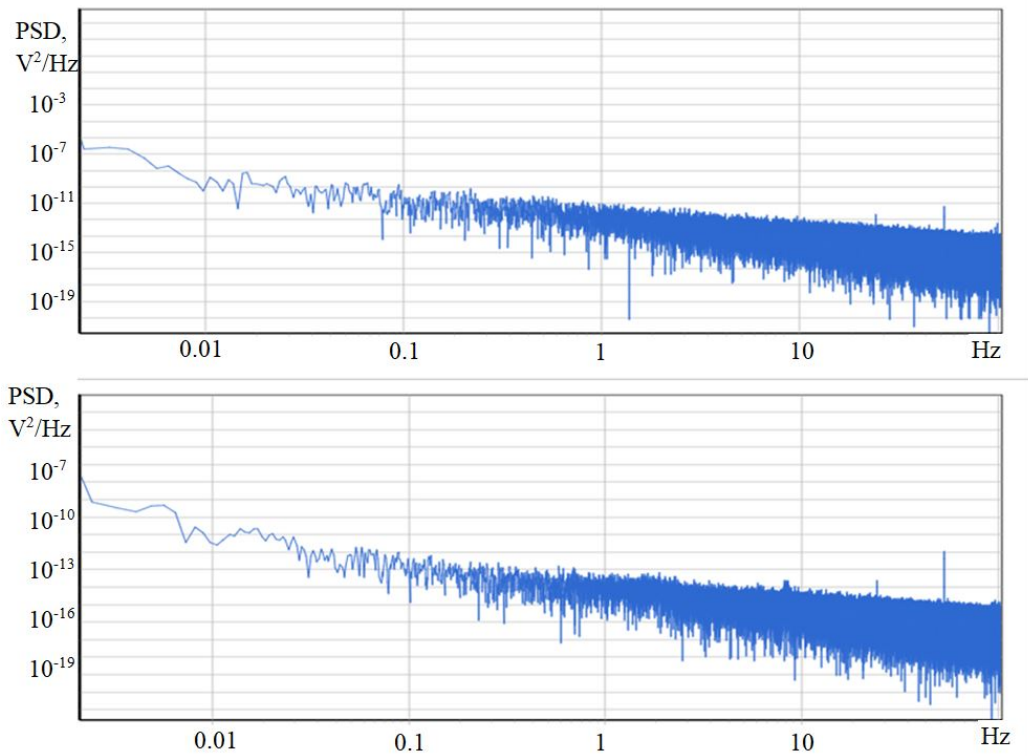


Рисунок 8 – Спектры НЧ шума образца 12 с использованием неодимового магнита  
 Figure 8 – LF noise spectra of sample 12 using a neodymium magnet

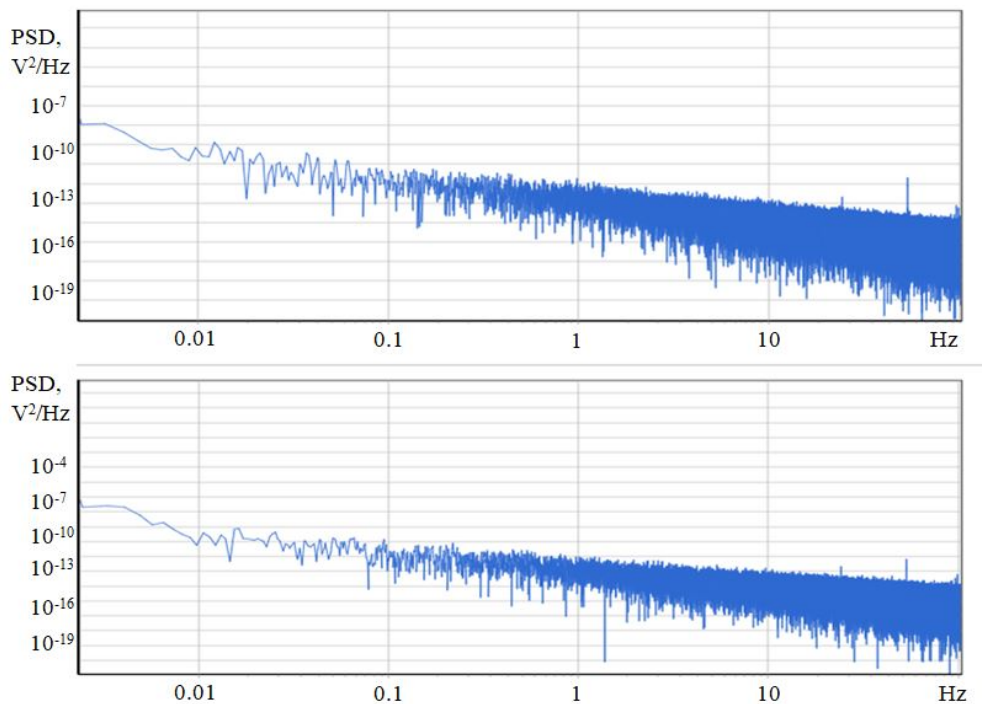


Рисунок 9 – Спектры НЧ шума образца 12 с использованием электромагнитной катушки  
 Figure 9 – Low frequency noise spectra of sample 12 using an electromagnetic coil

#### Заключение

При токе 0,1 А, проходящем через магнитоуправляемый контакт, разброс контактных сопротивлений составил 5,6 %, а при токе 0,2 А наблюдался больший разброс, достигающий 21 %. Наблюдаемую девиацию контактного сопротивления можно связать со сложностью повторного воспроизведения линий магнитного поля при замыкании геркона постоянным магнитом.

Использование электромагнитной катушки в качестве источника магнитного поля в устройстве для замыкания контактов геркона позволило достичь большей идентичности параметров повторных экспериментов по сравнению со случаями применения неодимового магнита или бариевого феррита с одинаковыми параметрами. Параметры спектров НЧ шума рассчитаны при помощи разработанной программы, позволяющей аппроксимировать характерные участки зависимости до и после частоты перегиба с вычислением СПМ и показателей формы спектра  $\beta$ . Обнаруженные эффекты оказывают влияние на измерение параметров НЧ шума, что вносит вклад в получаемые статистические данные.

Полученные результаты планируется использовать при дальнейшем совершенствовании методики прогнозирования надежности магнитоуправляемых контактов с помощью спектроскопии НЧ шума.

#### Библиографический список

1. Семенов А. Р., Литвинов В. Г., Холомина Т. А., Ермачихин А. В., Кострюков С. А., Логинов Д. С. Разработка автоматизированного комплекса для исследования спектров низкочастотного шума в элементах и структурах электронной техники // Радиотехника. 2017. № 5. С. 179-185.
2. 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.
3. Loginov D. S., Kholomina T. A., Litvinov V. G., Rybin N. B., Semenov A. R., Rybina N. V. Comprehensive implementation of the magnetic contact reliability test method // Proceedings of the 2020 30th International Conference Radioelektronika (RADIO-ELEKTRONIKA). 2020, pp. 134-138.
4. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. 2008. № 6. С. 168-174.
5. Горлов М., Емельянов А., Смирнов Д. Возможность отбраковки полупроводниковых приборов по уровню низкочастотного шума // Компоненты и технологии. 2005. № 8. С. 198-201.
6. Жигальский Г. П. Шумы вида  $1/f$  и нелинейные эффекты в тонких металлических плёнках // УФН. 1997. Т. 167. № 6. С. 623-647.
7. Жигальский Г. П. Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 512 с.
8. Куликов Е. И. Методы измерения случайных процессов. М.: Радио и связь, 1986. 272 с.
9. Ван-дер-Зил А. Шум. Источники, описание, измерение. М.: Сов. радио, 1973. 229 с.
10. Логинов Д. С., Литвинов В. Г., Холомина Т. А., Семенов А. Р., Рыбин Н. Б. Исследование шумовых характеристик герметизированных магнитоуправляемых контактов // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 11(18). С. 64-70.

UDK 53.084.6; 53.084.872-876

### STUDY OF SWITCHING CONDITIONS INFLUENCE ON THE MEASUREMENT OF LOW FREQUENCY NOISE SPECTRUM OF MAGNETICALLY CONTROLLED CONTACTS

**D. S. Loginov**, postgraduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

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

**T. A. Kholomina**, Dr. Sci (Phys. and Math.), full professor, the department of micro- and nanoelectronics, RSREU, Ryazan, Russia;

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

**I. F. Sherova**, master student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-6515-8939, e-mail: sherova.ira@mail.ru

*The results of an experimental study of the influence of switching conditions: the magnitude of currents and magnetic field sources of switching devices on the characteristics of magnetically controlled contacts*



are presented. To determine the necessary parameters, the transfer characteristics obtained due to the inclusion of the studied reed contact according to the scheme of a classical four-pole were used.

The analysis of a set of experimental conditions determining the magnitude and spread of the resistance values of magnetically controlled contacts during repeated switching, as well as the influence of the magnetic field sources of switching devices on the reproducibility of parameters calculated according to the developed program: the shape index and the spectral power density of LF noise. The experimental conditions under which the maximum reproducibility of the results is achieved are revealed.

**The purpose of this work** is to study the factors affecting the spread of the resistance value and the parameters of the LF noise spectra during multiple repeated switching of the reed contact using a magnetic field from different sources.

**Key words:** LF noise, magnetically controlled contacts, measuring installation, contact resistance, power spectral density.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2022-82-228-236

### References

1. **Semenov A. R., Litvinov V. G., Kholomina T. A., Ermachihin A. V., Kostrjukov S. A., Loginov D. S.** Razrabotka avtomatizirovannogo kompleksa dlja issledovanija spektrov nizkochastotnogo shuma v jelementah i strukturah jelektronnoj tehniki. *Radiotekhnika*. 2017, no 5, pp. 179-185 (in Russian).
2. **Loginov D. S., Kholomina T. A., Litvinov V. G.** Izmeritel'no-analiticheskij kompleks dlja avtomatizirovannyh ispytanij magnitoupravljaemyh kontaktov. *Radiotekhnika*. 2022, vol. 86, no 3, pp. 134-140 (in Russian).
3. **Loginov D. S., Kholomina T. A., Litvinov V. G., Rybin N. B., Semenov A. R., Rybina N. V.** Comprehensive implementation of the magnetic contact reliability test method. *Proceedings of the 2020 30th International Conference Radioelektronika (RADIO-ELEKTRONIKA)*, pp. 134-138.
4. **Razumenko D.** Nizkochastotnye shumy jelektronnyh komponentov kak instrument dlja diagnostiki vnutrennih defektov. *Komponenty i tehnologii*. 2008, no 6, pp. 168-174 (in Russian).
5. **Gorlov M., Emel'janov A., Smirnov D.** Vozmozhnost' otrabovki poluprovodnikovyh priborov po urovnju nizkochastotnogo shuma. *Komponenty i tehnologii*. 2005, no 8, pp. 198-201 (in Russian).
6. **Zhigal'skij G. P.** Shumy vida  $1/f$  i nelinejnye jeffekty v tonkih metallicheskih pljonkah. *UFN*. 1997, vol. 167, no 6, pp. 623-647 (in Russian).
7. **Zhigal'skij G. P.** *Fluktuacii i shumy v jelektronnyh tverdotel'nyh priborah*. Moscow: FIZMATLIT, 2012, 512 p. (in Russian).
8. **Kulikov E. I.** *Metody izmerenija sluchajnyh processov*. Moscow: Radio i svjaz', 1986, 272 p. (in Russian).
9. **Van-der-Zil A.** Shum. Istochniki, opisanie, izmerenie. Moscow, Sov.radio, 1973, 229 p. (in Russian).
10. **Loginov D. S., Litvinov V. G., Kholomina T. A., Semenov A. R., Rybin N. B.** Issledovanie shumovyh harakteristik germetizirovannyh magnitoupravljaemyh kontaktov. *Radiotekhnika*. 2019, vol. 83, no. 11(18), pp. 64-70 (in Russian).