

На правах рукописи



Логинов Денис Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ
В НИЗКООМНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ**

1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» на кафедре «Микро- и наноэлектроника»

Научный руководитель:

Холомина Татьяна Андреевна, заслуженный работник высшей школы РФ, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Микро- и наноэлектроника», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Официальные оппоненты:

Мирошникова Ирина Николаевна, доктор технических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой электроники и наноэлектроники, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Клюев Алексей Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, доцент кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи радиотехнического факультета, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород.

Ведущая организация:

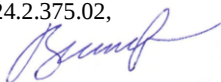
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград, Москва.

Защита состоится 12 марта 2024 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, г.Рязань, ул.Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ»: <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.02,
д.ф.-м.н., доцент



Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Нижние пределы чувствительности электронных приборов обычно определяются шумами тока и напряжения - их случайными колебаниями вблизи средних значений. Полезный сигнал может стать недоступным, если уровень шума в приборе слишком высок, что ограничивают динамический диапазон рабочих характеристик. Разрешающая способность и точность измерительной техники во многом определяются низкочастотными (НЧ) шумами. Проявление такого шума не позволяет повысить относительную точность измерения временных промежутков даже при неограниченном увеличении времени измерения.

Спектроскопия низкочастотных шумов является актуальным неразрушающим экспериментальным методом, позволяющим связать параметры спектров НЧ шума с особенностями физических свойств объектов исследования.

Диагностика приборов по спектрам НЧ шума - это методика, которая позволяет прогнозировать ресурс работы электронных компонентов. Увеличение спектральной плотности мощности НЧ шума свидетельствует о повышении разупорядоченности системы, источник которой в каждом случае индивидуален. Для выявления источника повышенного НЧ шума в ряде работ применяют специально разработанные для каждого объекта или прибора целенаправленные экстремальные воздействия, позволяющие достоверно определить локализацию и природу дефекта.

Эффективность контроля качества и адекватность прогнозирования надежности исследуемых объектов определяются точностью, достоверностью и возможностью автоматизации измерения параметров НЧ шума. Особая роль принадлежит возможности использования в экспериментальных целях самого информативного НЧ диапазона, т.е. частот ниже 10 Гц.

В современной РЭА широко применяют коммутационные устройства с разрывными контактами, которые предназначены для периодического замыкания электрических цепей с током (реле, герконы, различного рода выключатели и переключатели). Надежность аппаратуры во многом определяется коммутационной устойчивостью таких низкоомных (с контактным сопротивлением в несколько Ом) устройств, в этой связи ее изучение с помощью шумовой диагностики в инфранизком диапазоне частот представляет собой актуальную задачу.

В научно-технической литературе, посвященной обсуждаемой тематике, приведены многочисленные результаты изучения низкочастотных шумов в полупроводниковых приборах и многослойных барьерных структурах, а также тонких металлических пленках при помощи разработанных авторами экспериментальных установок с параметрами, соответствующими объектам измерения. Например, в работах Г.П. Жигальского изучалась природа НЧ шума в металлических пленках на частотах выше 10 Гц, в работах Т.А.Холоминой, С.А.Кострюкова – в высокоомных полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами на частотах выше 1 Гц при помощи установки для измерения спектров НЧ шума со спектральной плотностью мощности собственного шума на уровне 10^{-12} В²/Гц, содержащей плату сбора данных и

управляемой программой, созданной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Экспериментальные установки для исследования характеристик НЧ шума в электронных компонентах и их программное обеспечение в настоящее время обычно являются авторскими в связи со сложностью приобретения автоматизированных измерителей электрических шумов промышленного выпуска с необходимыми параметрами.

В доступной научно-технической литературе не обнаружено результатов изучения характеристик шума низкоомных элементов электроники (коммутационных устройств) на частотах ниже 1 Гц, а также информации о принципах создания экспериментальных установок, позволяющих проводить такие исследования. Под низкоомными элементами мы понимаем коммутационные устройства в замкнутом состоянии с контактным сопротивлением менее 3 Ом.

В этой связи разработка и техническая реализация экспериментальной установки - автоматизированного измерительно-аналитического комплекса с соответствующим программным обеспечением для спектроскопии НЧ шума низкоомных коммутационных элементов электроники, отличающегося высоким быстродействием и низким уровнем собственного шума, представляет собой актуальную проблему. Особое значение приобретает возможность изучения и выделения полос стационарности общего спектра случайного процесса генерации шума.

Основополагающими работами, оказавшими влияние на проведенные автором теоретические и экспериментальные исследования, являются труды Г.П.Жигальского, М.Букингема, А.Ван-дер Зила, П.Т.Орешкина, В.Г.Литвинова, Т.А.Холоминой, С.А.Кострюкова, А.М.Гуляева, И.Н. Мирошниковой, А.В. Ключева, Д.В.Разуменко.

Цель работы - разработка и создание экспериментального автоматизированного измерительно-аналитического комплекса с уровнем собственного шума ниже уровня шума измеряемых образцов и исследование характеристик шума коммутационных устройств с контактным сопротивлением менее 3 Ом на частотах ниже 100 Гц.

Для достижения цели в работе решаются следующие основные **задачи**.

— Проанализировать состояние проблемы, тенденций развития методов измерения и физических моделей, описывающих природу генерации низкочастотного шума в полупроводниковых структурах, тонких металлических пленках и электронных компонентах.

— Разработать и технически реализовать измерительно-аналитический комплекс для автоматизированных испытаний низкоомных элементов с сопротивлением менее 3 Ом (магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле), позволяющий проводить измерения спектров плотности мощности низкочастотного шума в диапазоне частот 0,01 - 100 Гц, а также их многократную коммутацию.

— Сочетанием схмотехнических и программных решений обеспечить собственную спектральную плотность мощности измерительно-аналитического комплекса меньшую СПМ шума в исследуемых низкоомных коммутационных компонентах.

— Разработать специальное программное обеспечение для управления работой комплекса, в котором реализовать функции вывода полученной информации в текстовом и графическом форматах, а также загрузки файлов для получения спектров плотности мощности НЧ шума.

— При помощи метода вариаций Аллана изучить особенности генерации случайного процесса НЧ шума низкоомных элементов и выявить условия, при которых этот процесс является стационарным.

— Обосновать выбор объектов и методик экспериментальных исследований.

— Выявить факторы, влияющие на воспроизводимость результатов измерения характеристик НЧ шума образцов при разных условиях эксперимента.

— Разработать методику, позволяющую провести экспресс-диагностику и оценку ресурса электронных компонентов на основании экспериментально полученных характеристик НЧ шума.

— Разработать методику проведения экспериментов, приводящих к восстановлению либо деградации характеристик объектов исследования, а также автоматизированной обработки результатов.

— Исследовать влияние искусственного износа, а также восстановительной технологической обработки на характеристики и параметры НЧ шума низкоомных коммутационных устройств.

Объекты и методы исследований. Объектами исследования являлись магнитоуправляемые контакты и электромагнитные реле, изготовленные по промышленной технологии.

Для исследования параметров спектров НЧ шума применены разработанный и технически реализованный автоматизированный измерительно-аналитический комплекс и разработанное необходимое программное обеспечение НЧ шумовой спектроскопии низкоомных коммутационных устройств.

С целью выявления условий проявления стационарности процесса генерации НЧ шума применен метод вариации (отклонения) Аллана к изучению спектров низкочастотного шума низкоомных коммутационных элементов электронной техники.

С целью экспресс-диагностики и изучения возможности оценки ресурса работы электронных компонентов (магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле) разработана и реализована методика эксперимента, сочетающая НЧ шумовую спектроскопию с автоматизированными многократными коммутационными испытаниями в качестве функциональной нагрузки, имитирующей естественный износ

Структура и химический состав поверхности образцов исследованы при помощи растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV в режиме вторичной электронной визуализации (SEI) с ускоряющим напряжением 30 кВ.

Для изучения физических процессов в исследованных образцах применены методы численного математического моделирования на ПЭВМ.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

— соответствием положениям существующих физических моделей генерации НЧ шума;

— воспроизводимостью полученных экспериментальных данных;

— значительным объемом тестовых экспериментов;
— апробацией полученных результатов на конференциях различного уровня и экспертизой опубликованных статей в рецензируемых журналах.

Научная новизна представленных в работе результатов заключается в следующем.

1. Установлено, что в ограниченном диапазоне частот процесс генерации низкочастотного шума можно считать стационарным. На базе аналитических соотношений, лежащих в основе метода вариации (дисперсии) Аллана, разработаны алгоритм и программа для изучения стационарности спектров низкочастотного шума низкоомных элементов электронной техники – магнитоуправляемых контактов. На всех зависимостях дисперсии Аллана, построенных на основе экспериментальных данных измерения спектральной плотности мощности, присутствует участок, свидетельствующий о стационарности случайного процесса.

2. Разработаны алгоритм для автоматизированного управления экспериментальной установкой и программное обеспечение для его реализации, которое позволяет задавать режимы измерения спектров НЧ шума и проводить испытания коммутационных устройств при значениях тока в коммутируемой цепи 0,1-3,0 А, частоты 2-100 Гц заданное количество раз (10^3 - 10^6).

3. Разработана методика экспресс-диагностики магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле, позволяющая повысить быстродействие измерений и обработки результатов исследования параметров НЧ шума и контактного сопротивления на частотах выше 0,1 Гц за счет авторских схемотехнических и программных решений, которая может быть использована для прогнозирования ресурса (коммутационной устойчивости) на основе совокупности данных НЧ шумовой спектроскопии и коммутационных испытаний, имитирующих естественный износ.

4. Проанализированы и определены факторы, влияющие на параметры НЧ шума и контактного сопротивления низкоомных элементов электронной техники; установлена взаимосвязь параметров НЧ шума и контактного сопротивления с режимами коммутации и характером воздействия: имитацией износа или восстановительной обработкой приборов.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Сочетание в автоматизированном измерительно-аналитическом комплексе аналого-цифрового преобразователя, встроенного в микроконтроллер, с цифровыми БИХ-фильтрами 6-го порядка позволяет снизить спектральную плотность мощности собственного шума комплекса до 10^{-15} В²/Гц, что на 3-4 порядка меньше СПМ шума в исследуемых коммутационных компонентах.

2. Методика оценки интервала стационарности процесса генерации низкочастотного шума, основанная на методе дисперсии Алана, позволяет выделить стационарный диапазон случайного процесса в коммутационных низкоомных электронных компонентах и провести обработку шумового сигнала в этом диапазоне.

3. Создание покрытия Au-Ru на поверхности пермаллоевых пластин магнитоуправляемых контактов позволяет снизить спектральную плотность

мощности низкочастотного шума на 1-1,5 порядка (10-17дБ) и величину контактного сопротивления в 1,5-2 раза.

4. Применение переменного шага временной дискретизации позволяет снизить время проведения эксперимента по спектроскопии низкочастотного шума с 30 и более минут до 3-5 минут с сохранением не менее чем 90% -го совпадения результатов.

Теоретическая и практическая значимость

1. При помощи алгоритма и программы, разработанных на основе аналитических соотношений метода вариации Аллана, впервые получены зависимости дисперсии Аллана, примененные к обработке спектров НЧ шума низкоомных элементов электронной техники – магнитоуправляемых контактов, позволяющие выделить ряд типовых составляющих: шумов квантования, белого и фликкер-шума, а также винеровского процесса и линейного дрейфа.

2. Разработан и технически реализован автоматизированный измерительно-аналитический комплекс для испытаний низкоомных коммутационных устройств, позволяющий проводить в едином измерительном цикле измерения спектров плотности мощности низкочастотного шума в диапазоне частот 0,01 - 100 Гц, а также многократную коммутацию элементов в различных режимах.

3. Техническая реализация экспериментальной установки осуществлена с помощью 12 разрядного АЦП с обработкой и отправкой данных в режиме реального времени без задержки и накопления сигнала, что позволяет непосредственно наблюдать за процессом измерения. Реализована возможность автоматизированного гибкого управления режимом тестирования коммутационных устройств за счет схемотехнических и программных решений, позволяющих производить испытания при заданных с высокой точностью значениях тока, напряжения и частоты переключения.

4. Для обеспечения работы комплекса разработано специальное программное обеспечение в среде разработки STM32CubeIDE 1.3.0. Высокая тактовая частота 48 МГц, встроенные интерфейсы и АЦП позволяют в реальном времени реализовать измерение, обработку экспериментальных данных и передачу информации для последующей аппроксимации и анализа.

5. Математическая обработка спектров плотности мощности НЧ шума реализована на основе разработанных алгоритма и специальной программы, позволяющей задавать режимы измерения спектров НЧ шума и проводить коммутационные испытания. Реализованы функции вывода полученной информации в текстовом и графическом форматах, а также загрузки файлов для получения спектров НЧ шума. В режиме анализа полученных или загруженных графических зависимостей предусмотрена возможность аппроксимация методом линейной регрессии и автоматический поиск точки перегиба аппроксимирующих прямых, что позволяет вычислить основные параметры спектра НЧ шума.

6. Разработана экспресс-методика прогнозирования коммутационной устойчивости магнитоуправляемых контактов на основе сочетания имитаций естественного износа с предшествующим и последующим измерением параметров спектров НЧ шума, а также контролем поверхности материала контактов при помощи РЭМ. Реализована функция экспресс-анализа с совпадением результатов, полученных при долгосрочных измерениях, не ниже 90 % за счет возможности

изменения разрешающей способности в диапазоне 0,0003-1,5 Гц и высокой частоты дискретизации АЦП до 36 кГц. Это позволяет варьировать время измерения в диапазоне 0,5-60 минут и фиксировать спектры низкочастотного шума на частотах выше 0,1 Гц за 2-3 минуты. Методика сочетает в едином измерительном цикле автоматизированное получение спектров низкочастотного шума и последующее проведение коммутационных испытаний без отключения исследуемых низкоомных объектов с сохранением исходного сопротивления контактов.

Внедрение результатов. Полученные научные результаты использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 и магистров по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника». Разработанные оборудование, программное обеспечение и методика внедрены и используются в исследовательских лабораториях Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования при ФГБОУ ВО «РГРТУ», а также АО «Рязанская радиоэлектронная компания» (г.Рязань). Созданные измерительно-аналитический комплекс для автоматизированных испытаний коммутационных устройств и программное обеспечение, а также разработанные методики внедрены в технологический процесс входного контроля на предприятии АО «Рязанская радиоэлектронная компания». Внедрение и использование подтверждено документально.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на профильных международных, всероссийских конференциях, симпозиумах : 25-й международной конференции по шумам и флуктуациям ICNF Невшаталь, Швейцария, 2019г.; 30-й международной конференции Radioelektronika, Братислава, Словакия, 2020 г.; XII-й международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике» , Нальчик, Россия, 2021г.; международной конференции по физике, С.-Пб, Россия, 2021г., международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании», 2018-2023 гг.; Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях», 2019, 2022, 2023 гг., симпозиуме «Актуальные проблемы современной науки и производства» 2019-2023 гг. Рязань, РГРТУ, XXX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2023», МИЭТ, а также на ежегодных научно-технических конференциях Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 27 научных работах, включая 5 публикаций в изданиях, рекомендуемых ВАК, 4 публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of science, 15 публикаций в статьях, а также материалах всероссийских и международных конференций, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Автором разработаны структурные, функциональные и электрические принципиальные схемы отдельных узлов и измерительно-аналитического комплекса в целом. Автором внесен основной вклад в получение, обработку и интерпретацию экспериментальных результатов,

написание научных статей в составе авторского коллектива и подготовку их к публикации, представление докладов на конференциях. Положения и результаты, выносимые на защиту, сформулированы и получены автором.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 119 наименований и приложений. Диссертационная работа содержит 174 страницы, в том числе 168 страниц основного текста, 16 таблиц и 102 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определены цель и основные задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ литературных данных, описывающих основные характеристики и параметры низкочастотных шумов в твердом теле, а также методов их изучения. Проанализированы существующие модели генерации НЧ шума в твердых телах и электронных компонентах. Рассмотрены особенности прогнозирования надежности приборов и компонентов с помощью НЧ шумовой диагностики.

Ключевой характеристикой флуктуационных (случайных) процессов является спектральная плотность мощности (СПМ) $S(f)$, описывающая распределение мощности шума по частотному спектру зависимостью $S(f) \sim 1/f^\beta$, где β — коэффициент, называемый также показателем формы спектра.

Автокорреляционная функция $K(\tau)$ и энергетический спектр $S(f)$ стационарного случайного процесса, как пара преобразования Фурье, обладают всеми присущими этому преобразованию свойствами.

Проанализированы современные методы исследования низкочастотных шумов твердых тел и электронных компонентов. Цифровые и аналого-цифровые методы изучения спектров НЧ шума являются наиболее перспективными.

В связи со сложностью приобретения автоматизированных измерителей электрических шумов промышленного выпуска, обладающих необходимыми параметрами, экспериментальные установки для исследования характеристик НЧ шума электронных компонентов и их программное обеспечение, как правило, являются авторскими.

Особенности проявления низкочастотного шума в твердых телах и электронных компонентах являются объектом исследования научного сообщества в течение длительного времени, однако его природа в разных объектах и условиях остается предметом дискуссии. В основе теоретических моделей, которые в конечном итоге приводят к соотношению вида $S(f) \sim 1/f^\beta$, как правило, лежат физические процессы с большими временами корреляции, широким набором энергий активации и времен релаксации. Многочисленные теоретические модели генерации НЧ шума удовлетворительно описывают процесс при выполнении конкретных приближений. Многие экспериментальные данные показывают, что равновесный шум вида $1/f^\beta$ в проводниках возникает главным образом вследствие флуктуаций подвижности носителей заряда.

Результаты и выводы большинства опубликованных работ свидетельствуют о важной роли дефектов структуры материалов и приборов в процессах

формирования избыточного шума. Вопрос о природе формирования НЧ шума в объемных проводниковых материалах остается открытым. Результаты исследования НЧ шума в объемных низкоомных объектах и контактных устройствах в опубликованной научно-технической литературе не обнаружено.

Прогнозирование ресурса работы и надежности электронных компонентов по параметрам НЧ шума в качестве неразрушающей универсальной диагностики, по мнению многих авторов, является перспективным, поскольку занимает немного времени и дает достоверные результаты. В сочетании с другими методами диагностики и целенаправленными внешними воздействиями низкочастотные шумы электронных компонентов позволяют исследовать их скрытые дефекты, недоступные для изучения другими методами, на любом этапе процесса производства.

Во второй главе представлены результаты разработки, технической реализации и исследования работы автоматизированного измерительно-аналитического комплекса, при помощи которого проведены эксперименты по многократной коммутации (искусственному износу) низкоомных проводниковых объектов и последующему исследованию спектров низкочастотного шума с целью оценки ресурса работы приборов.

Для технического усовершенствования установки и упрощения работы по изучению характеристик НЧ шума низкоомных объектов было принято решение отказаться от измерений при помощи отдельной платы сбора данных и перейти к более практичному варианту – применению встроенного в микроконтроллер АЦП.

Кроме того, для прогнозирования ресурса работы исследуемых контактных устройств проведена разработка отдельного автоматического устройства многократной коммутации в качестве воздействия, имитирующего естественный износ, с предшествующим и последующим измерениями спектров НЧ шума. Принципиальная схема устройства многократной коммутации представлена на рисунке 1.

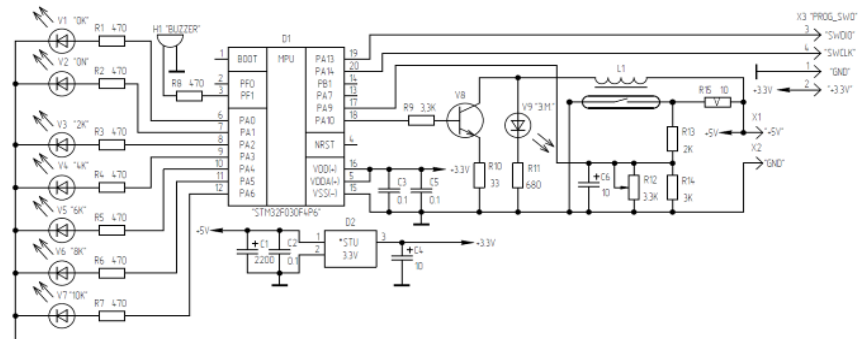


Рисунок 1 – Принципиальная схема устройства многократной коммутации

Для экспресс-диагностики параметров и коммутационной надежности магнитоуправляемых контактов с помощью НЧ шумовой спектроскопии разработан автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс, в котором реализованы:

- высокая скорость измерения и коммутации;
- автоматическая подстройка режимов износа контактов по току и напряжению;
- питание от лабораторного источника питания;
- двойное управление с персонального компьютера и органов управления устройства;
- индикация режимов работы и состояния эксперимента;
- выведение сервисной (отладочной) информации для настройки устройства.

Разработанный автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс реализован на базе 32 битного

высокопроизводительного микроконтроллера STM32, что позволяет организовать управление коммутируемой цепью, обратную связь для обеспечения защитных функций, прием данных от датчиков и обработку полученной информации, а также обмен данными с ПК.

Измерительно-аналитический комплекс позволяет автоматически при заранее заданных параметрах цепи в режиме реального времени провести исследования - выполнять многократную коммутацию магнитоуправляемых контактов для последующих исследований спектров НЧ шума, состава и морфологии поверхности контактов.

Функциональная схема разработанного измерительно-аналитического комплекса для испытаний магнитоуправляемых контактов представлена на рисунке 2. Экспериментально обнаружено, что СПМ собственного шума комплекса - постоянная величина, не зависящая от частоты, равная 10^{-15} В²/Гц. Параметры разработанного комплекса приведены в таблице 1.

Для обеспечения работы комплекса разработано специальное программное обеспечение в среде разработки STM32CubeIDE 1.3.0. под используемый микроконтроллер STM32F103C8T6, который

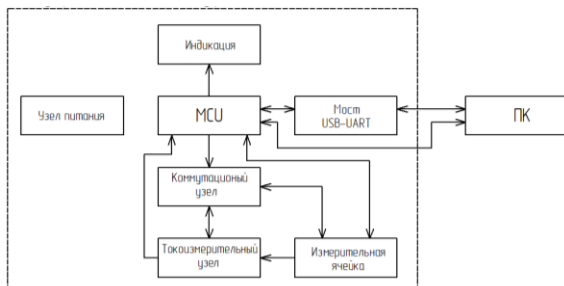


Рисунок 2 – Функциональная схема разработанного измерительно-аналитического комплекса для исследования низкоомных элементов

выполнять многократную коммутацию магнитоуправляемых контактов для последующих исследований

Таблица 1 – Параметры разработанного измерительно-аналитического комплекса

Время измерения спектра, мин	0,5-60
Частота выборки, Гц	0,0003-1,5
Частота дискретизации, кГц	36
Тип аппроксимации	экспонента
Диапазон измерения спектра, Гц	0,01-100
Уровень собственного шума, В ² /Гц	10^{-15}
Частота коммутации геркона, Гц	1-1000
Время проведения коммутации, мин	1-2880
Ток коммутируемой цепи, А	0-3
Напряжение коммутируемой цепи, В	0,1-10
Разрядность АЦП, Бит	12
Напряжение питания комплекса, В	24
Потребляемый ток, А	не более 2
Интерфейс передачи данных	USB 2.0
Формат вывода данных	.bmp, .txt

позволяет с высокой производительностью производить обработку данных и одновременно работать с USB, ADC, GPIO, SPI по командам с ПК. Высокая тактовая частота 48 МГц позволяет в реальном времени реализовать измерение, обработку и передачу измеряемой информации для последующей обработки, и исследования.

Обработка экспериментальных спектров НЧ шума проведена при помощи разработанной специальной программы, позволяющей аппроксимировать характерные участки зависимости до и после точки (частоты) перегиба (изменения угла наклона аппроксимирующих прямых) с вычислением параметров - соответствующих показателей формы спектра НЧ шума β .

В третьей главе представлены методические аспекты проведения экспериментальных исследований. Разработаны алгоритм и программа, с помощью которых установлена возможность применения метода вариации (отклонения) Аллана к изучению спектров низкочастотного шума низкоомных объектов электронной техники. Полученные результаты позволяют утверждать, что в ограниченном диапазоне частот, который имеет место на практике, процесс генерации низкочастотного шума можно считать стационарным с возможностью применения соответствующих методов обработки результатов. На рисунке 3 приведен пример графика отклонения Аллана для спектра НЧ шума магнитоуправляемого контакта, из которого видно наличие стационарной шумовой составляющей. В определенном диапазоне, где отклонение Аллана не зависит от времени, нестационарный в целом шумовой процесс, является стационарным.

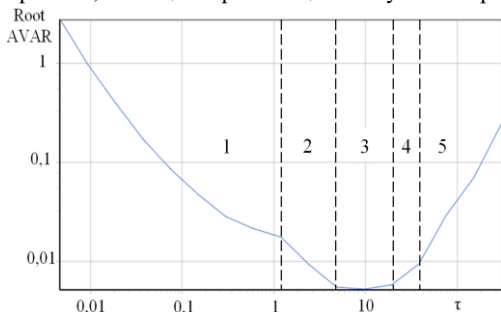


Рисунок 3 – График отклонения Аллана для спектра НЧ шума, где: 1 – шум квантования; 2 – белый шум;

3 – фликер шум; 4 – винеровский процесс;
5 – линейный дрейф

Установлено, что предложенная в работе методика экспресс - диагностики при помощи НЧ шумовой спектроскопии продолжительностью менее 5 минут, за счет возможности изменения разрешающей способности и высокой частоты дискретизации АЦП, позволяет получить сведения об исследуемом объекте с достоверностью не менее 90% по сравнению с более длительными исследованиями.

Приведены таблицы, содержащие параметры исследованных образцов

магнитоуправляемых контактов промышленного выпуска, с контактными пластинами из сплава железа и никеля (низконикелевого пермаллоя). Контактные пластины части образцов имели покрытие из осажденных гальваническим методом золота и рутения.

Для выявления и исследования факторов, влияющих на воспроизводимость результатов измерения характеристик НЧ шума магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле при их многократной коммутации (замыкании) с помощью магнитного поля от разных источников (для магнитоуправляемых контактов),

исследована одна из партий, состоящая из 15 герконов МКА-14103, предназначенных для коммутации цепей постоянного и переменного токов и партия реле, состоящая из 5 образцов.

С целью определения девиации (разброса) контактного сопротивления герконов и реле при их включении по схеме классического четырехполюсника и многократной коммутации в разных режимах изучена статистика изменений значения выходного напряжения четырехполюсника при постоянном входном и разных токах, проходящих через герконы и реле (передаточные характеристики).

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

Обработка измеренных значений параметров спектров НЧ шума проведена в среде MathCad. Для сглаживания графиков зависимостей использованы методы подбора коэффициентов и регрессия линейной комбинацией функций скалярного аргумента (*linfit*).

Структуру, морфологию и химический состав поверхности исследуемых образцов после вскрытия изучали с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV, оснащенного приставкой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA X-Max20. Изучение морфологии образцов проводили в режиме вторичной электронной визуализации (SEI) с ускоряющим напряжением 30 кВ. Исследование химического состава поверхности образцов проводилось при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Разработаны последовательность и методика проведения экспериментальных исследований с помощью разработанного автоматизированного измерительно-аналитического комплекса.

Четвертая глава посвящена изложению и анализу результатов исследования параметров и характеристик НЧ шума низкоомных коммутационных устройств, а также состава и морфологии поверхности контактных пластин герконов. Анализ экспериментальных результатов показал, что нанесение покрытия Au-Ru снижало величину контактного сопротивления герконов одной партии в среднем в 1,5-2 раза. Установлено, что в образцах с покрытием контактных пластин СПМ НЧ шума снижалась в среднем на 1-1,5 порядка за счет повышения инертности поверхности контактных пластин, на которых без покрытия возможно образование диэлектрических пленок. Наличие золото-рутениевого покрытия приводило к снижению показателя формы спектра β на 30-50%. Таким образом, при наличии золото-рутениевого покрытия контактных пластин герконов наблюдались более стабильные характеристики, позволяющие прогнозировать повышение ресурса их работы. Подтверждены предположения о возможной природе возникновения и особенностях спектральных характеристик НЧ шума объемных низкоомных объектов на основе

представлений о флуктуациях подвижности и, отчасти, концентрации электронов в проводящих покрытиях электродов герконов, проявление которых коррелирует с особенностями структуры (дефектностью) образцов. Доказательством может служить взаимосвязь контактного сопротивления, СПМ и показателя формы спектра НЧ шума, которые изменяются синхронно (рисунок 4).

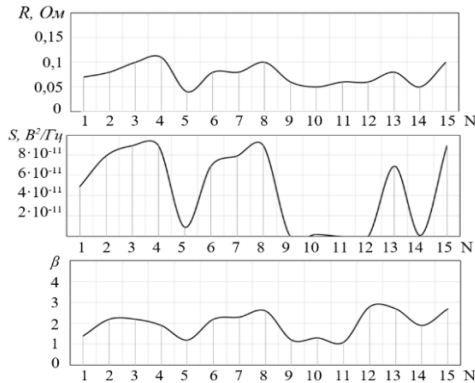


Рисунок 4 - Сопоставление значений R_n , β и СПМ НЧ шума для 15-ти образцов одной партии (N – номер образца)

Предложена методика, позволяющая прогнозировать ресурс работы магнитоуправляемых контактов. В качестве функционального воздействия, имитирующего естественный износ герконов, применена многократная коммутация с количеством циклов 10^3 - 10^6 с предшествующим и последующим изучением параметров спектров НЧ шума, а также структуры поверхности контактных пластин.

Исследовано влияние искусственного износа на характеристики НЧ шума магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле.

Обнаружено, что многократная коммутация привела к росту до 2-х раз контактного сопротивления, СПМ на 3-4 порядка, показателя формы спектра НЧ шума в 1,5-3 раза (рисунки 5, 6), а также площади пятен контактной эрозии в 2-3 раза при увеличении числа циклов коммутации магнитоуправляемых контактов, особенно при превышении значения 10^3 - 10^4 .

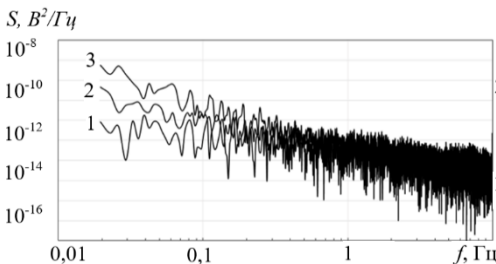


Рисунок 5 – Спектры НЧ шума:
1 - исходного магнитоуправляемого контакта; 2 - после 10^3 ;
3 - $5 \cdot 10^4$ циклов коммутации при величине тока 0,1 А

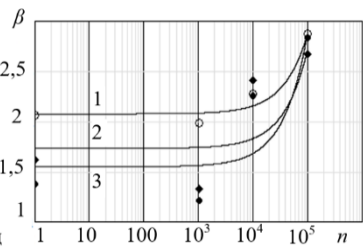


Рисунок 6 – Зависимость показателя формы спектра β 3-х герконов одной партии от числа циклов искусственного износа магнитоуправляемых контактов n

Установлено, что многократная коммутация электромагнитных реле привела к росту до 3-6 раз контактного сопротивления, СПМ НЧ шума – до 5 порядков величины, показателя формы спектра в 2-2,5 раза, особенно значительно при превышении числа циклов искусственного износа значения 10^3 - 10^4 . Таким образом, результаты коммутационных испытаний низкоомных коммутационных устройств обоих типов, проведенные в соответствии с разработанной методикой, идентичны.

Экспериментально выявлено, что площади контактных пятен анода и катода каждого образца практически одинаковы. Кроме того, с ростом количества циклов коммутации растут площади контактной эрозии анода и катода конкретного образца.

Исследовано влияние восстановительной обработки партии герконов, забракованных по повышенному контактному сопротивлению, на величину сопротивления и характеристики НЧ шума. Восстановительная технологическая обработка магнитоуправляемых контактов, привела к снижению сопротивления в 3-8 раз до кондиционных величин, а также СПМ НЧ шума в среднем на 3 порядка и коэффициента формы спектра β до 2,5 раз.

Установлено, что последующий искусственный износ восстановленных герконов вызвал более резкий рост контактного сопротивления, СПМ НЧ шума и коэффициента формы спектра β по сравнению с ростом аналогичных параметров образцов с кондиционным R_n (рисунки 7, 8). Особенно значительным оказался рост СПМ НЧ шума: до 5 порядков величины на частоте 0,01 Гц.

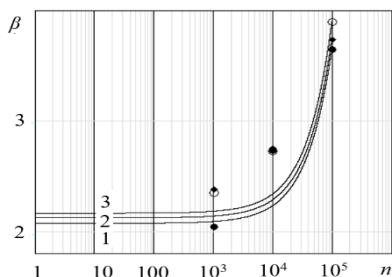


Рисунок 7 - Зависимость показателя формы спектра 3-х восстановленных образцов от числа циклов искусственного износа n

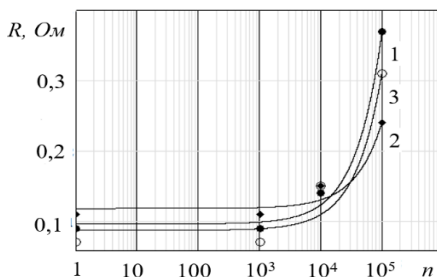


Рисунок 8 - Зависимость сопротивления 3-х восстановленных герконов от числа циклов искусственного износа n

Таким образом, установлено, что спектральная плотность мощности и коэффициент формы спектра НЧ шума являются характеристиками, чувствительными к возможному отказу компонента. Разработанные автоматизированный измерительно-аналитический комплекс со специальным программным обеспечением и предложенные методики показали эффективность при проведении входного контроля электромагнитных и герконовых реле на предприятии АО «Рязанская радиоэлектронная компания».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами исследований в диссертации получены научные, методические и практические результаты, связанные с исследованием характеристик спектров низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле с помощью разработанных измерительно-аналитического комплекса, специального программного обеспечения и методики математической обработки результатов.

1. Разработан и технически реализован измерительно-аналитический комплекс для автоматизированных испытаний магнитоуправляемых контактов, позволяющий проводить измерения спектров плотности мощности низкочастотного шума в диапазоне частот 0,01 - 100 Гц, а также их многократную коммутацию. Спектральная плотность мощности собственного шума комплекса не выше 10^{-15} В²/Гц, что на 3-4 порядка меньше СПМ шума в исследуемых коммутационных компонентах. Техническая реализация осуществлена с помощью 12 битного АЦП с обработкой и отправкой данных в режиме реального времени без задержки и накопления сигнала, что позволяет непосредственно наблюдать за процессом измерения.

2. На основе аналитических соотношений метода вариации (дисперсии) Аллана разработаны алгоритм и программа для изучения стационарности спектров низкочастотного шума низкоомных элементов электронной техники – магнитоуправляемых контактов. Установлено, что в ограниченном диапазоне частот процесс генерации низкочастотного шума можно считать стационарным.

3. Разработано специальное программное обеспечение в среде STM32CubeIDE 1.3.0. для управления работой комплекса. Высокая тактовая частота 48 МГц позволила реализовать измерение, математическую обработку экспериментальных данных и передачу информации для последующей аппроксимации и анализа в реальном масштабе времени.

4. В программном обеспечении реализованы функции вывода полученной информации в текстовом и графическом форматах, а также загрузки файлов для получения спектров плотности мощности НЧ шума. В режиме анализа полученных или загруженных графических зависимостей предусмотрена возможность аппроксимация методом линейной регрессии и автоматический поиск точки перегиба аппроксимирующих прямых, что позволяет вычислить основные параметры спектра НЧ шума.

5. Разработана методика, основанная на совместном применении экспресс-шумовой диагностики и многократных коммутационных испытаний, имитирующих естественный износ, позволяющая прогнозировать ресурс работы магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле (коммутационную устойчивость).

6. Реализована возможность гибкого управления режимом коммутационных испытаний магнитоуправляемых контактов за счет схемотехнического решения, позволяющего производить их при заданных с высокой точностью значениях тока, напряжения и частоты переключения.

7. Выявлены и исследованы факторы, влияющие на воспроизводимость результатов измерения характеристик НЧ шума магнитоуправляемых контактов при их многократной коммутации (замыкании) с помощью магнитного поля от разных источников. Выявлено, что 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.

8. Показано, что разработанная методика экспресс - диагностики при помощи спектроскопии низкочастотного шума продолжительностью менее 5 минут, позволяет получить сведения об исследуемом объекте, совпадающие с полученными в результате более длительных исследований, не менее чем на 90%.

9. Установлено, что создание стабилизирующего покрытия Au-Ru на поверхности пермаллоевых пластин магнитоуправляемых контактов позволило снизить величину контактного сопротивления в 1,5-2 раза, спектральной плотности мощности НЧ шума на 1-1,5 порядка показателя формы спектра β - на 30-50%.

10. Обнаружено, что многократная коммутация привела к росту до 2-х раз контактного сопротивления, СПМ НЧ шума на 3-4 порядка, показателя формы спектра в 1,5-3 раза, а также площади пятен контактной эрозии в 2-3 раза при увеличении числа циклов коммутации магнитоуправляемых контактов, особенно при их превышении значения 10^3 - 10^4 .

11. Выявлено, что восстановительная технологическая обработка магнитоуправляемых контактов, забракованных по повышенному контактному сопротивлению, привела к снижению сопротивления в 3-8 раз до кондиционных величин, а также СПМ НЧ шума в среднем на 3 порядка и показателя формы спектра β до 2,5 раз.

12. Установлено, что последующий искусственный износ восстановленных герконов вызвал более резкий рост контактного сопротивления, СПМ НЧ шума и коэффициента формы спектра по сравнению с ростом аналогичных параметров образцов с кондиционным R_k . Особенно значительным оказался рост СПМ НЧ шума: до 5 порядков величины на частоте 0,01 Гц. В процессе исследований установлено, что спектральная плотность мощности и коэффициент формы спектра НЧ шума являются характеристиками, чувствительными к возможному отказу компонента.

Автор выражает глубокую благодарность В.Г. Литвинову (РГРТУ) за совместное обсуждение результатов, Н.Б. Рыбину (РГРТУ) за помощь в проведении исследований на растровом электронном микроскопе, а также О.Н.Крютченко (АО «РЗМКП») за предоставленные для исследования образцы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Ермачихин А.В., Кострюков С.А., Логинов Д.С., Семенов А.Р. Разработка автоматизированного комплекса для исследования спектров низкочастотного шума в элементах и структурах электронной техники. Радиотехника. 2017. № 5. С. 179-185.

2. 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.

3. 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.

4. Логинов Д.С., Холомина Т.А., Шерова И.Ф. Исследование влияния условий коммутации на измерение спектра низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов // Вестник РГРТУ. 2022. № 82. С.228-236.

5. Логинов Д.С., Холомина Т.А., Литвинов В.Г., Ксендзов А.В. Применение метода вариации Аллана к изучению низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов // Вестник РГРТУ/Vestnic of RSREU. 2023. № 85. С.170-177.

Публикации в изданиях из перечня Web of Science и Scopus:

6. Loginov D.S., Krutchenko O.N., Litvinov V.G., Kholomina T.A., Ermachikhin A.V., Rybin N.B., Semenov A.R. Study of Low Frequency Noise Parameters of Metal Contacts // ICNFP 2019 – 25th International Conference on Noise and Fluctuation, Neuchâtel (Switzerland), 2019. P. 1-4.

7. 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). P. 134-138.

8. Investigation influence of switching tests coatings of magnetically controlled contacts on the surface structure / D. S. Loginov, A. V. Baskakova, V. G. Litvinov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 18–22 октября 2021 года. Saint Petersburg, 2021. P. 012232.

9. Логинов Д.С., Баскакова А.В., Зинуков А.А., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Мишустин В.Г. Исследование влияния многократной коммутации на параметры НЧ-шума магнитоуправляемых контактов // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», 31 мая – 5 июня 2021 г., Нальчик, Россия. С. 449-454.

Охранные документы:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022615607. Программа для расчета и визуализации зависимости спектральной плотности мощности низкочастотного шума // Логинов Д.С., Семенов А.Р., Холомина Т.А.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (RU). – заявка №2022614003; дата поступления 21.03.2022 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 31.03.2022г.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022681218. Программа управления микроконтроллером установки измерения флуктуационных характеристик электронных компонентов // Логинов Д.С., Кошкин И.О., Семенов А.Р., Холомина Т.А.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (RU). – заявка №2022680424; дата поступления 28.10.2022 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 10.11.2022 г.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20236116185. Программа для расчета и визуализации частоты перегиба зависимости спектральной плотности мощности низкочастотного шума // Логинов Д.С., Холомина Т.А., Кошкин И.О., Шерова И.Ф., Семенов А.Р.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (RU). – заявка №2023614602; дата поступления 13.03.2023 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23.03.2023 г.

Прочие публикации:

13. Логинов Д.С., Ермачихин А.В., Холомин А.Ю., Семенов А.Р. Разработка блока установки спектроскопии НЧ шума для исследования низкоомных объектов. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании». СТНО-2017. Сборник трудов. Том 4. Рязань: РГРТУ, 2017. С. 166-171.

14. Логинов Д.С. Исследование шумовых характеристик металлических контактов. XXIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань, 2018. Т. 2. С 127-128.

15. Логинов Д.С., Крютченко О.Н., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Ермачихин А.В., Рыбин Н.Б., Семенов А.Р. Исследование параметров НЧ шума металлических контактов. СТНО-2019 //Труды международной научно-технической и научно-методической конференции. Рязань, 2019. Т. 2. С 84-88.

16. Логинов Д.С., Холомина Т.А., Рыбин Н.Б., Баскакова А.В. Техническая реализация метода испытания надежности магнитных контактов - Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань, 27-29 ноября 2019 г. С. 22-31.

17. Д.С. Логинов, В.Г. Литвинов, Т.А. Холомина, Н.Б. Рыбин. Техническая реализация испытания надежности магнитоуправляемых контактов // Современные технологии в науке и образовании: СТНО-2020. III международный научно-технический форум, Рязань, апрель 2020 г. С. 69-75.

18. Баскакова А.В., Логинов Д.С. Исследование низкочастотных шумов в магнитных контактах // Современные технологии в науке и образовании: СТНО-2020. III международный научно-технический форум, Рязань, апрель 2020 г. С. 87-89.

19. Логинов Д.С., Холомина Т.А., Литвинов В.Г., Зинуков А.А. Устройство для автоматизированных испытаний магнитоуправляемых контактов // Современные технологии в науке и образовании: СТНО-2021. IV международный научно-технический форум. Том 2, Рязань, Book Jet. 2021.С. 56-61.

20. Зинуков А.А., Логинов Д.С., Холомина Т.А. Алгоритм работы устройства для испытаний магнитоуправляемых контактов // Современные технологии в науке и образовании: СТНО-2021. IV международный научно-технический форум. Т. 2, Рязань, Book Jet. 2021.С. 71-74.

21. Баскакова А.В., Логинов Д.С., Рыбин Н.Б. Исследование структуры поверхности покрытий магнитоуправляемых контактов после их коммутационных испытаний // Современные технологии в науке и образовании: СТНО-2021. IV международный научно-технический форум, Рязань, апрель 2021 г. С. 47-51.

22. Разработка автоматизированного измерительно-аналитического комплекса для многократной коммутации (искусственного износа) магнитоуправляемых контактов / Д. С. Логинов, Т. А. Холомина, Я. К. Щегольков // Актуальные проблемы современной науки и производства: Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции, Рязань, 27–29 ноября 2021 года. Рязань. 2021. С. 45-50.

23. Логинов Д.С., Шерова И.Ф. Зависимость девиации сопротивления геркона от режима коммутации // Новые информационные технологии в научных исследованиях – НИТ-2022. Материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань: ИП Коняхин А. В. (Book Jet), 2022. Т. 2. С. 117-119.

24. Логинов Д.С. Исследование спектров НЧ шума магнитоуправляемых контактов с помощью АЦП микроконтроллера STM32. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании». СТНО-2022. Сборник трудов. Том 2. Рязань: РГРТУ, 2022. С. 90-94.

25. Логинов Д.С., Шерова И.Ф., Холомина Т.А. Исследование влияния многократной коммутации (искусственного износа) магнитоуправляемых контактов на спектры низкочастотного шума // Актуальные проблемы современной науки и производства. Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. Рязань: РГРТУ, 2022. С. 135-142.

26. Логинов Д.С., Рыбин Н.Б., Холомина Т.А., Шерова, И.Ф. Исследование влияния Au-Ru покрытий магнитоуправляемых контактов на параметры спектров низкочастотного шума // Сборник трудов международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании». СТНО-2023. Т. 2. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 75-78.

27. Логинов Д.С., Шерова И.Ф. Влияние режимов многократной коммутации на параметры спектров НЧ шума и структуру поверхности магнитоуправляемых контактов // Тезисы докладов XXX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2023» М.: МИЭТ, 2023. С. 34.

Логинов Денис Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ
В НИЗКООМНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 25.12.2023. Формат бумаги 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.