

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

На правах рукописи



Логинов Денис Сергеевич

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

Специальность 1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор Т.А. Холомина

Рязань 2023

Содержание

Введение.....	4
1 Основные характеристики и методы изучения низкочастотного шума.....	13
1.1 Характеристики и параметры низкочастотных шумов в твердом теле...	14
1.2 Методы исследования низкочастотных шумов электронных компонентов	20
1.3 Физические модели низкочастотного шума.....	40
1.4 Прогнозирование надежности электронных компонентов по параметрам низкочастотного шума	50
Выводы.....	57
2 Разработка измерительно-аналитического комплекса и программного обеспечения.....	60
2.1 Разработка и реализация установки для измерения низкочастотного шума низкоомных элементов и программного обеспечения	60
2.2 Разработка и техническая реализация установки для искусственного износа (многократной коммутации) магнитоуправляемых контактов	68
2.3 Разработка измерительно-аналитического комплекса и программного обеспечения	71
Выводы.....	88
3 Объекты и методика исследования	90
3.1 Описание образцов.....	90
3.2 Методические особенности экспериментальных исследований	95
3.3 Методические аспекты исследования структуры контактных пластин герконов с помощью электронной микроскопии	103
3.4 Последовательность экспериментальных исследований.....	105
Выводы.....	112

4 Исследование параметров и характеристик низкочастотного шума коммутационных компонентов.....	114
4.1 Исследование влияния покрытий контактов герконов сплавами Au-Ru на спектры НЧ шума.....	114
4.2 Исследование взаимосвязи величины контактного сопротивления с параметрами спектров НЧ шума	119
4.3 Исследование влияния искусственного износа на характеристики НЧ шума магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле	122
4.4 Исследование влияния восстановительной технологической обработки на характеристики НЧ шума магнитоуправляемых контактов	139
Выводы.....	150
Заключение	151
Библиографический список	155
Приложение А. Схема электрическая принципиальная	169
Приложение Б. Свидетельства.....	170
Приложение В. Акты о внедрении	173

Введение

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 [1], М.Букингема [2], А.Ван-дер Зила [3], П.Т.Орешкина [4], В.Г.Литвинова [5], Т.А.Холоминой [6], С.А.Кострюкова [7], А.М.Гуляева, И.Н. Мирошниковой [8], А.В. Ключева [9], Д.В.Разуменко [10].

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 схемотехнических 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 имитации 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 Невшатель, 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 внесён 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.

1 Основные характеристики и методы изучения низкочастотного шума

1.1 Характеристики и параметры низкочастотных шумов в твердом теле

Началом экспериментального изучения НЧ шума считают 1925 год, когда Дж. Б. Джонсон, исследовавший флуктуации тока термоэлектронной эмиссии, обнаружил новый вид шума, спектральная плотность которого возрастала с увеличением частоты. В настоящее время принято называть этот вид шума избыточным, фликкерным (мерцательным) или $1/f$ – шумом. В ряде работ к избыточным шумам в электронных приборах относят также генерационно-рекомбинационный и взрывной [1, 2].

В 30-х годах прошлого века аналогичное явление было обнаружено в шумовом спектре металлических пленок и в 40-50 годах – полупроводников [10].

Ключевой характеристикой флуктуационных (случайных) процессов является спектральная плотность мощности (СПМ), описывающая распределение мощности шума по частотному спектру [1-3]. Мощность, приходящаяся на единицу полосы частот и выделяемая на сопротивлении 1 Ом, является физическим смыслом спектральной плотности мощности шума. На рисунке 1.1 приведена характерная для подавляющего большинства электронных компонентов зависимость СПМ шума от частоты - спектр. Единица измерения СПМ — $V^2/Гц$ или $A^2/Гц$. В частотном диапазоне спектра шума электронных компонентов выделяют две области. В области средних частот СПМ шума равномерна и не зависит от частоты. Такой шум называется белым (значение S_0 на рисунке 1.1 – величина СПМ белого шума) [2].

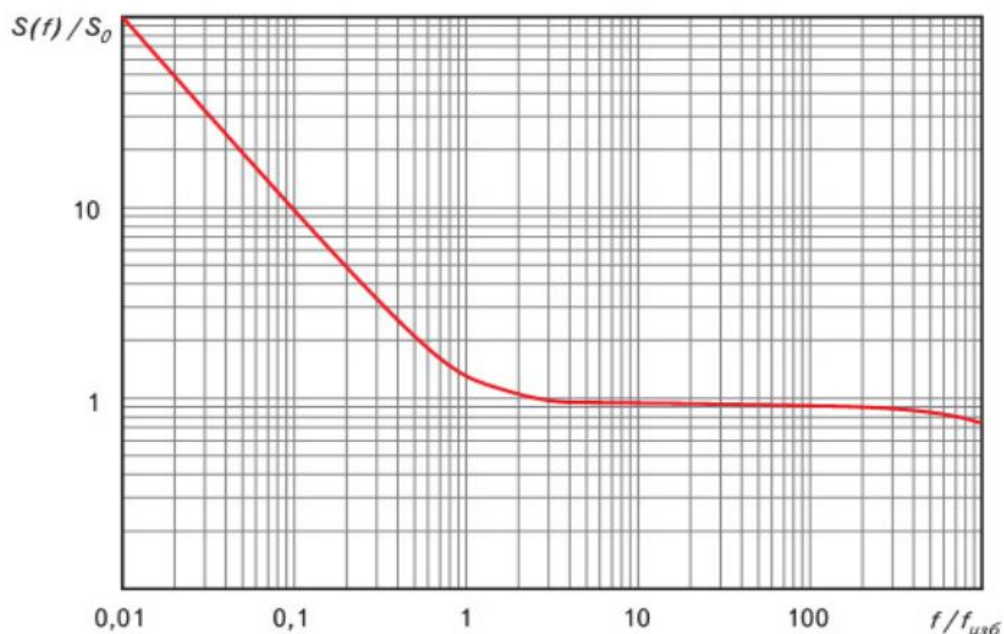


Рисунок 1.1 - Спектральная плотность мощности шума электронных компонентов [1]

Для области низких частот характерен спад СПМ с увеличением частоты. Частота, на которой происходит переход от спадающего участка СПМ шума к горизонтальному, называется частотой избыточного шума $f_{изб}$. На этой частоте мощности избыточного и белого шума равны.

Стационарный случайный процесс электрических флуктуаций во времени может быть представлен неупорядоченной последовательностью импульсов напряжения или тока, следующих друг за другом через случайные интервалы времени. Процесс со случайной последовательностью импульсов является неперiodическим. Однако, можно говорить о спектре такого процесса, рассматривая его как распределение мощности по частотам.

Спектральная плотность мощности определяется соотношением [1]:

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\Delta P(f)}{\Delta f}, \quad (1.1)$$

где $\Delta P(f)$ - усредненная по времени мощность шума в полосе частот Δf на частоте измерения f .

Из (1.1) следует, что СПМ шума имеет размерность Вт/Гц. В общем случае СПМ является функцией частоты. Зависимость СПМ шума от частоты

называют энергетическим спектром, который содержит информацию о динамических характеристиках системы.

Энергетический спектр $S(f)$ стационарного случайного процесса $x(t)$ связан преобразованием Фурье с автокорреляционной функцией $K(\tau)$ согласно теореме Винера-Хинчина:

$$S_x(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} K(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (1.2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, i – мнимая единица.

Автокорреляционная функция $K(\tau)$ представляет собой обратное преобразование Фурье от спектральной плотности мощности шума $S_x(f)$

$$K(\tau) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) \cdot e^{i\omega\tau} d\omega. \quad (1.3)$$

Автокорреляционная функция стационарного случайного процесса $K(\tau)$ является четной функцией временного сдвига τ , следовательно, выражение (1.3) можно преобразовать к виду, удобному для расчетов:

$$K(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_x(\omega) \cdot \cos(\omega\tau) d\omega = \int_0^{\infty} S_x(f) \cdot \cos(2\pi f\tau) df. \quad (1.4)$$

Отсюда при $\tau = 0$ (и при $x(t)=0$) получают выражение для дисперсии случайной величины $x(t)$:

$$\sigma_x^2 = x^2(t) = K(0) = \int_0^{\infty} S_x(f) df, \quad (1.5)$$

которая представляет собой среднеквадратичное значение случайной величины $x(t)$, а для случая электрических сигналов – мощность шума, выделяемая на сопротивлении 1 Ом.

Автокорреляционная функция $K(\tau)$ и энергетический спектр $S(f)$ стационарного случайного процесса, как пара преобразования Фурье, обладают всеми присущими этому преобразованию свойствами. В частности, чем шире эффективная ширина спектра, тем быстрее изменяется значение флуктуирующей переменной, и тем быстрее процесс забывает свое начальное

состояние, т.е. с увеличением ширины полосы частот энергетического спектра время корреляции τ_K уменьшается.

Таким образом, чем меньше ширина функции корреляции случайного процесса на оси временного сдвига τ , тем шире его спектр. Для всех процессов с одинаковой формой энергетического спектра и, следовательно, с корреляционной функцией одного вида произведение $\Delta f \cdot \tau_K$ является некоторой константой [1].

В научно-технической литературе [1-3, 7, 12, 13] и др. подробно рассмотрены особенности проявления и характеристики существующих разновидностей шумов (тепловой, дробовой, генерационно-рекомбинационный и др.). Анализ указанных процессов не входит в задачи настоящей диссертационной работы.

Как отмечалось выше, фликкер-шум (от англ. flicker — мерцание), также называемый низкочастотным или $1/f$ шумом, представляет собой флуктуации тока и напряжения в изучаемом объекте, спектральная плотность которых меняется по закону $S(f) \sim 1/f^\beta$, где β — коэффициент, называемый также показателем формы спектра.

СПМ фликкер-шума как функция частоты f и тока I может быть аппроксимирована выражением [1]

$$S(f, I) = K_1 I^a f^{-\beta}, \quad (1.6)$$

где постоянный коэффициент K_1 , показатель степени a и показатель формы спектра β определяются свойствами исследуемого объекта. Показатель степени a при токах, не приводящих к локальным перегревам, обычно близок к двум $a \approx 2$, а показатель β обычно составляет $0,8 \leq \beta \leq 1,4$.

Шум вида $1/f^\beta$ присущ множеству природных явлений и присутствует практически во всех материалах и элементах электроники. Спектральная зависимость вида (1.6) наблюдалась у некоторых приборов в широком диапазоне частот, перекрывающем двенадцать и более декад ($10^{-6} - 10^6$ Гц) [11].

Многочисленные экспериментальные данные [1-3, 12] и др. свидетельствуют о том, что вероятностное распределение амплитуд шумового $1/f^{\beta}$ сигнала хорошо соответствует гауссовому распределению. В [12] отмечены отклонения вероятностного распределения амплитуд НЧ шума от закона Гаусса. В качестве возможной причины указанного предполагается наличие в разных образцах взрывного шума. По мнению М.Букингема [2], слабыми расхождениями в периферийных частях распределения Гаусса в практических случаях можно пренебречь.

Наличие нижней граничной частоты является результатом ограниченности времени наблюдения и, как следствие, порождает споры о стационарности НЧ шума. Обсуждение рядом авторов проблемы стационарности процесса генерации НЧ шума, рассмотренное далее в разделе 1.3, пока не привело к ее решению.

Важным параметром, характеризующим НЧ шум, является так называемый параметр Хоуге. Вопрос о величине этого параметра остается предметом дискуссии, однако эмпирический закон Хоуге общепризнан. Закон Хоуге описывает зависимость СПМ шума вида $1/f$ от числа свободных носителей заряда.

Ф.Хоуге [14] сопоставил большое число полученных разными авторами экспериментальных данных по величине НЧ шума в полупроводниках и металлических пленках. Расположение точек зависимости СПМ от количества свободных носителей позволило обнаружить качественную закономерность, из которой следовало, что СПМ шума обратно пропорциональна общему числу носителей заряда в образце N_0 :

$$\frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{S_U(f)}{U^2} = \frac{\alpha_H}{N_0 f}, \quad (1.7)$$

где $S_R(f)$ – СПМ $1/f$ -шума по сопротивлению R , $S_U(f)$ – СПМ шума по напряжению U , α_H – константа Хоуге, который принял $\alpha_H=2\cdot 10^{-3}$ за универсальный коэффициент [14].

Дальнейшие исследования показали, что α_H не является универсальной константой и правильнее называть его параметром [1, 13, 15, 16]. Анализ, опубликованных данных показал, что указанный параметр для разных твердых тел может принимать значение от 10^{-9} до 10^{-2} .

Несмотря на отсутствие теоретического обоснования, закономерность (1.7) отражает характерную особенность проявления $1/f$ шума в полупроводниковых приборах, полупроводниках и металлических пленках – рост СПМ шума при увеличении удельного сопротивления объекта. Было замечено снижение уровня $1/f$ шума в сильнолегированных полупроводниках и выдвинута гипотеза, согласно которой флуктуирует только та часть подвижности, которая обусловлена рассеянием на фононах. Одним из подтверждений этой гипотезы является тензорный характер флуктуации проводимости, обнаруженный в пленках хрома, золота, висмута и углерода. В соответствии с гипотезой возникновения $1/f$ шума вследствие рассеяния на фононах было получено модифицированное выражение для параметра Хоуге [6, 13]:

$$\alpha = \left(\frac{\mu}{\mu_L}\right)^2 \cdot \alpha_H, \quad (1.8)$$

где μ – эффективная подвижность носителей заряда, μ_L – решеточная подвижность.

Считается, что исключений из эмпирического закона Хоуге нет, хотя он не является точным, поскольку параметр Хоуге α_H может изменяться, как отмечено выше, на 7 порядков. Закон Хоуге не предполагает наличие единого механизма генерации $1/f^{\beta}$ -шума в разных объектах, а лишь указывает тенденцию изменения $S(f)$ от числа свободных носителей заряда.

Автор [12] отметил, что эмпирическая формула Хоуге (1.7) дает точность до одного – двух порядков.

Сказать, что имеется исчерпывающее теоретическое обоснование всех особенностей проявления $1/f^{\beta}$ -шума в разных объектах пока сложно, попытки обобщения имеющихся теоретических и экспериментальных результатов продолжаются.

1.2 Методы исследования низкочастотных шумов электронных компонентов

Практическое применение диагностики электронных компонентов по параметрам НЧ шума в лабораторных и особенно промышленных условиях предусматривает необходимость высокой производительности измерений при сохранении приемлемой точности. Измерительные комплексы для изучения шума, производимые за рубежом, являются уникальными и дорогостоящими, при этом сведения об оптимизации реализуемых в этих системах измерительных процедур ограничены [10]. Существует и проблема сложности приобретения отечественных автоматизированных измерителей электрических шумов промышленного выпуска с необходимыми параметрами. В этой связи экспериментальные установки исследования характеристик НЧ шума и их программное обеспечение, как правило, являются авторскими.

При изучении электрических шумов используют аналоговые, аналого-цифровые и цифровые методы измерений параметров флуктуационных сигналов.

Для получения достоверной информации на основании диагностики электронных компонентов по низкочастотным шумам главным условием является отсутствие у измерителя собственного шума. Другими словами, необходимо применение малошумящего высокочувствительного низкочастотного усилителя, имеющего широкую полосу пропускания и достаточно большой коэффициент усиления. Как правило спектральная плотность мощности электрических флуктуаций в различных элементах ИС находится в пределах $10^{-20} - 10^{-15} \text{ В}^2/\text{Гц}$ для широкого диапазона частот [1].

Можно считать указанные значения СПМ минимальными, требующими усиления.

Спектральная плотность мощности шума электронных компонентов на разных частотах измеряется с помощью специальных измерительных приборов, которые называются анализаторами.

Анализаторы спектра предназначены для измерения интенсивности спектра исследуемого сигнала на разных частотах. По существу анализаторы спектра производят спектральное разложение входного сигнала. Простейший аналоговый анализатор состоит из частотно-избирательного узкополосного устройства с известной полосой пропускания, которое осуществляет разложение сигнала на его составляющие по частотам, детектора и индикатора для измерения мощности шума.

Аналоговый метод изучения флуктуационных процессов заключается в измерении сигнала при помощи аналогового тракта с последующим измерением анализатором спектра (рисунок 1.2) [17].

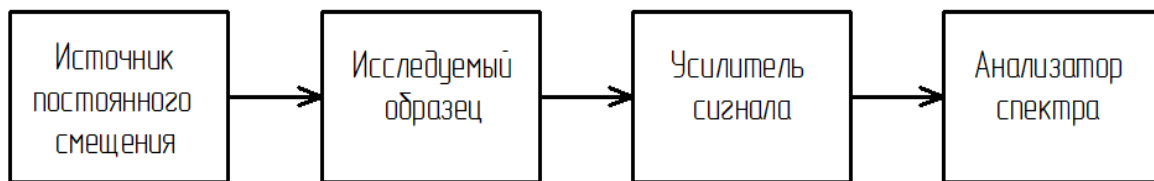


Рисунок 1.2 – Структурная схема установки измерения спектров электрических шумов аналоговым методом [17]

К аналоговым методам измерения электрических шумов относят прямой, корреляционный, а также метод сравнения. В книге [1] подробно рассмотрены их особенности и недостатки.

Аналого-цифровой метод изучения заключается в измерении сигнала низкочастотного шума с помощью аналогового тракта при прохождении сигнала и последующим измерением с помощью аналого-цифрового

преобразователя (АЦП). Структурная схема для установки измерения СПМ шума аналого-цифровым методом представлена на рисунке 1.3.

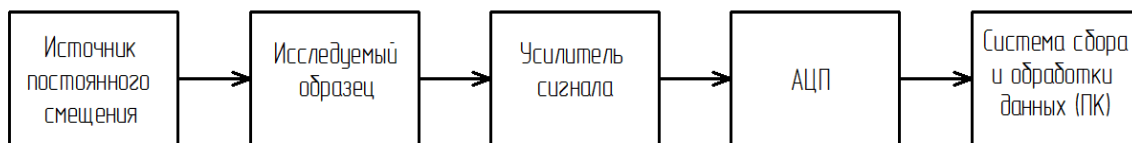


Рисунок 1.3 – Структурная схема для установки измерения спектров электрического шума аналого-цифровым методом

Рассмотренные выше методы объединяют источник постоянного смещения и усилитель. Источник постоянного смещения необходим для прохождения тока или подачи напряжения на исследуемый образец для генерации сигнала. Используют параллельное (рисунок 1.4, а) и последовательное (рисунок 1.4, б) подключение источника постоянного смещения к исследуемому образцу.

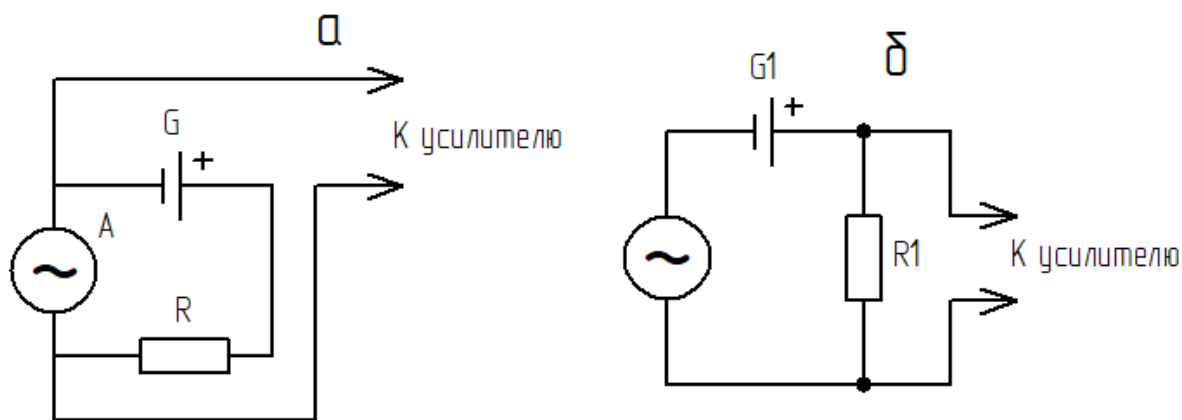


Рисунок 1.4 – Способы подключения источника постоянного смещения к исследуемому образцу: а) – параллельное; б) последовательное.

A-источник шума, R –резистор, задающий ток;

G- источник постоянного смещения [17]

Цифровые анализаторы спектра случайных сигналов обладают рядом преимуществ по сравнению с аналоговыми и аналого-цифровыми: повышение точности измерений, снижение времени измерений и обработки

результатов, а также сокращение расходов на специальное оборудование, в особенности это относится к измерениям СПМ шума на инфранизких частотах [1].

Наибольшее распространение в настоящее время получили цифровые системы обработки и анализа случайных процессов - флуктуационных сигналов НЧ шума, основанные на преобразовании Фурье.

Дискретное преобразование Фурье. Преобразование Фурье (ПФ) может использоваться как для непрерывных функций времени, так и для дискретных, в этом случае оно называется дискретным преобразованием Фурье (ДПФ).

Непрерывное преобразование Фурье — это преобразование, которое применяется к функции $x(t)$ заданной на интервале времени $(-\infty, +\infty)$. На практике обычно применяется ДПФ [1]. Если аналоговый сигнал имеет математическую модель типа непрерывной (или кусочно-непрерывной) функции, то соответствующий ему дискретный сигнал представляется последовательностью отсчетных значений сигнала $x(t)$ в определенные моменты времени t . Применительно к случайным процессам, при вычислении энергетического спектра $S_x(f)$ сигнала $x(t)$ по теореме Винера–Хинчина интеграл может быть заменен суммой.

Практически число членов ряда Фурье ограничивается определенным числом N , и ряд равномерно сходится при $N \rightarrow \infty$. Ограничение числа членов ряда значением N означает аппроксимацию сигнала системой базисных функций с определенной погрешностью, в зависимости от фактического спектра сигнала. В этом случае вычисление составляющих спектра в ДПФ выполняется по следующей формуле [1]:

$$S_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y_k \exp(-i2\pi f k / N), \quad (1.9)$$

где Y_k – комплексные амплитуды гармоник, $k = 0, \dots, N - 1$ — индекс спектральных компонентов (частотных составляющих) анализируемого

сигнала. Результатом вычислений S_n является комплексное число. После возведения в квадрат и сложения его реальной и мнимой частей получают мощность соответствующей спектральной составляющей.

Коэффициент S_0 (постоянная составляющая) является средним значением всех отсчетов, если $k = 0$, то получают условно нулевую гармонику случайного сигнала.

С позиций теории анализа сигналов в частотной области и точного восстановления их после преобразований в [1] отмечен ряд недостатков разложения сигналов в ряды Фурье с ограниченным числом членов. Указано на целесообразность применения в некоторых случаях оконного преобразования Фурье, при котором вместо одной базисной функции $\exp(-i2\pi f k/N)$ берется набор функций $p(t - n\Delta T) \times \exp(-i2\pi f k/N)$, где $p(t)$ — весовая функция оценок (временное окно) единичного преобразования Фурье, n — целое число, ΔT — интервал сдвига функции $p(t)$ по интервалу T задания сигнала. Размер носителя функции $p(t)$ и сдвигов ΔT обычно устанавливается соизмеримым с интервалом стационарности сигнала. Результатом оконного преобразования является семейство спектров, которыми отображается изменение спектра сигнала по интервалам ΔT .

Автор [1] указал, что если анализируются стационарные случайные процессы, зависимость СПМ от частоты, вычисленная по формуле ДПФ с нахождением модулей комплексных амплитуд, на самом деле является лишь оценкой, которая наиболее близка к истинному спектру. Воспроизводимость статистических характеристик исследуемого сигнала при переходе от выборки к выборке определяются в значительной степени ее продолжительностью.

Энергетический спектр случайного процесса связан с его автокорреляционной функцией по теореме Винера–Хинчина (1.2). При этом ДПФ является основным инструментом спектрального анализа при цифровой обработке случайных сигналов, с помощью которого получают спектральную плотность мощности случайного процесса [11, 18, 19].

Применением алгоритма так называемого быстрого преобразования Фурье (БПФ) можно существенно снизить количество операций. БПФ дает точно такой же результат, что и ДПФ, но при существенно меньшем количестве вычислений [1]. БПФ — это один из нескольких существующих алгоритмов быстрого вычисления прямого и обратного дискретных преобразований Фурье.

Сократить число выполняемых операций удастся за счет того, что обработка входного массива сводится к нахождению ДПФ для массивов с меньшим числом составляющих. Иногда под БПФ понимается один из быстрых алгоритмов, называемый алгоритмом прореживания по частоте/времени [1]. Алгоритм расчета СПМ шума с применением БПФ сводится к следующему: во-первых, к вычислению автокорреляционной функции согласно выражению (1.4), в котором интеграл заменяется суммой; во-вторых, к прореживанию, необходимому для проведения вычисления методом БПФ, или сглаживанию (в целях уменьшения влияния конечности выборки); и, наконец, к расчету энергетического спектра исследуемого процесса, который определяется как Фурье-преобразование от произведения автокорреляционной функции $K_T(\tau)$ и весовой функции $\omega(\tau)$, в котором интегрирование заменяется суммированием.

Анализ научно-технической литературы показал, что результаты ДПФ (или БПФ) это математическое приближение, состоящее в разложении исходного сигнала на синусоидальные и косинусоидальные составляющие.

Другие методы цифровой обработки флуктуационных сигналов. В работах [1, 10, 20-22] указано, что в ряде случаев применение ПФ недостаточно эффективно. Недостатки, связанные с математической обработкой результатов оцифровки исследуемого шумового сигнала с помощью преобразования Фурье, можно устранить, применив другие методы цифровой обработки шумовых сигналов, например, оконное преобразование Фурье (ОПФ), метод фликкер-шумовой спектроскопии или вейвлет анализ.

Установлено, что ПФ целесообразно использовать только при условии стационарного сигнала. Другими словами, ПФ можно эффективно применять только для тех сигналов, спектральные характеристики или частотное наполнение которых не зависят от времени. При частотном анализе таких сигналов временную информацию можно не рассматривать — все частоты спектра присутствуют в сигнале постоянно.

Однако реальные сигналы в той или иной степени нестационарны во времени. Примером может быть сигнал с частотной модуляцией. Смысл частотной модуляции состоит в том, что различные частотные составляющие сигнала появляются и исчезают в определенной последовательности. Однако, изучая частотный спектр такого сигнала, полученный при помощи ПФ, невозможно определить, когда и в какой последовательности появлялись и исчезали эти частотные составляющие [10]. Сигнал, соответствующий $1/f^\beta$ шуму, также содержит нестационарный компонент, который во многих случаях является наиболее информативным для диагностики потенциальной надежности объекта и внутренних дефектов. В этой связи, по мнению авторов [1, 10, 18], для анализа $1/f^\beta$ шума целесообразно использовать частотно-временное представление сигнала.

До недавних пор в подобных случаях применялось **ОПФ**. Для этого преобразования нестационарный сигнал делят на временные промежутки, внутри которых его можно считать стационарным. К каждому такому промежутку применяют ПФ. Каждый из полученных спектров оказывается привязанным к определенному отрезку времени. Таким образом возможно не только зафиксировать наличие определенной частоты в спектре сигнала, но и определить временной промежуток, когда эта частотная составляющая возникла или исчезла.

Описанное представление сигнала сталкивается с проблемой частотно-временного разрешения. Применение более узкого временного окна позволяет улучшить разрешение по времени (за счет худшего разрешения по частоте), и наоборот. ОПФ имеет фиксированное разрешение для всех

времен и частот, поэтому разрешение по частоте или по времени для выбранного участка может оказаться неоптимальным [10].

В некоторой степени эту проблему решает **вейвлет-преобразование** (ВП), применению которого в последние годы уделяется значительное внимание.

Особенность вейвлет-анализа заключается в том, что путем математической обработки временного ряда сигнала разложением по «маленьким волнам» - вейвлетам с варьирующейся длительностью, аналогично БПФ, он позволяет получить трехмерную картину зависимости вейвлет-мощности (аналог СПМ) от длительности вейвлета (величина, соответствующая обратному значению частоты) и времени исследуемого процесса [21, 22].

Базисными функциями для ВП являются не периодические комплексные экспоненты (синусы и косинусы), а функции конечной длительности (вейвлеты). Вейвлет рассматривают, как аналог оконной функции ОПФ. Как и в ОПФ, в ВП применяется раздельное преобразование (взвешивание сигнала с оконной функцией, или вейвлетом) для каждого временного промежутка. Но для каждого такого промежутка в ВП не применяется частотное преобразование, как в случае с вариацией Аллана [23]: информацию о частотных составляющих сигнала получают при помощи изменения ширины временного окна (вейвлета). ВП сочетает хорошее разрешение по времени на высоких частотах (плохое по частоте) и хорошее разрешение по частоте (плохое по времени) на низких частотах [10]. Особенно эффективно ВП в тех случаях, когда на фоне медленной составляющей сигнала может возникнуть относительно быстрая, что обычно и реализуется при исследовании низкочастотных шумов. Поэтому применение ВП для анализа качества и надежности электронных компонентов совершенно оправданно [10].

В работе Тимашева [24] показаны новые возможности получения информации на основе анализа длинновременных хаотических рядов

динамических переменных $V(t)$, характеризующих эволюцию сложных нелинейных, в том числе природных, систем методом компьютерной обработки сигналов после их оцифровки. Этот метод получил название метода **фликкер-шумовой** спектроскопии (Flicker-Noise Spectroscopy — FNS). Метод FNS применяется для анализа как стационарных, так и нестационарных случайных процессов.

Главное отличие фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) от других методов анализа случайных сигналов состоит во введении специальных информационных параметров, характеризующих составляющие исследуемых сигналов в разных диапазонах частот, и реализации процедур, необходимых для выделения таких параметров [10, 24].

Эта сложная модель приводит к интересным и важным практическим результатам: значимыми (с точки зрения информации о системе) являются не все точки на временной оси. Основная информация об эволюционном процессе системы содержится лишь в скачках, всплесках и разрывах производных сигнала. Все эти нерегулярности и рассматриваются в качестве единственных «маркеров» эволюционного процесса [10].

Как будет показано в разделе 1.3, несмотря на длительную историю изучения НЧ шумов в различных объектах, вопрос о его стационарности остается открытым. В последние годы для изучения особенностей случайных процессов получил распространение метод вариации Аллана [23], который также можно отнести к методам исследования НЧ шумов. В научно-технической литературе в большинстве случаев описано применение этого метода для оценки шумов неустойчивости показаний разных датчиков.

Вариация Аллана – это метод анализа временных последовательностей массивов данных для выявления характеристик шумов в функции усредненного времени. 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:

$$y_m = \int_0^{mT_0} S(t) dt. \quad (1.10)$$

Вариация Алана рассчитывается по формуле:

$$\sigma^2(nT_0) = \frac{1}{2(M-2n)(nT_0)^2} \sum_{m=1}^{M-2n} (y_{m+2n} - 2y_{m+n} + y_m)^2. \quad (1.11)$$

В ряде случаев вычисляется отклонение Аллана или корень квадратный из вариации 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 [23].

Экспериментальные установки для измерения и обработки сигналов НЧ шума. В [1] рассмотрен прямой классический метод измерения электрических шумов. Фактически цифровая измерительная установка состоит из тех же функциональных узлов, что и аналоговая (см. рис.1.2).

Различия между цифровой установкой и установкой для измерения электрических шумов прямым методом (рисунок 1.5) заключаются лишь в том, что аналоговый анализатор спектра здесь заменен стандартной ЭВМ с платой аналого-цифрового преобразователя (АЦП), при работе которого используется специальное программное обеспечение.

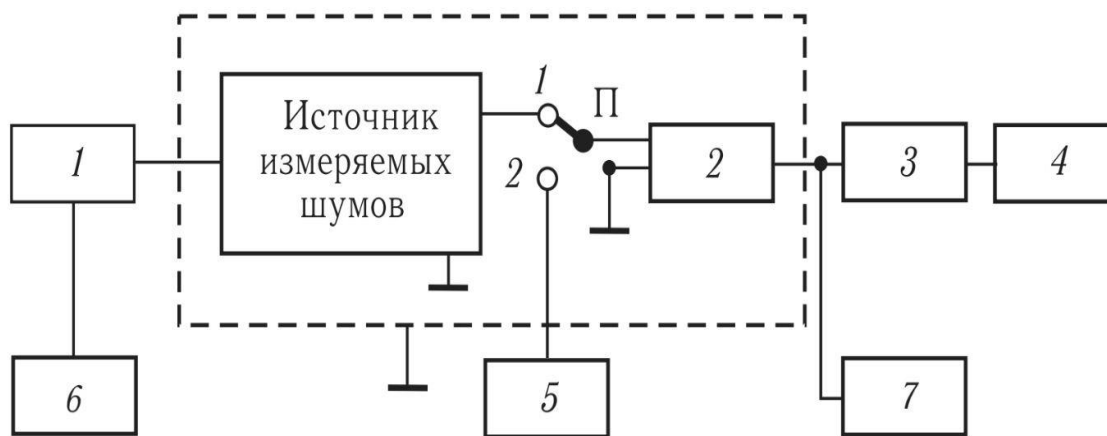


Рисунок 1.5 - Структурная схема установки для измерения электрических шумов прямым методом: 1 - блок задания режима работы; 2 – предварительный малошумящий усилитель; 3 –анализатор спектра; 4 – индикатор; 5 – калибровочный генератор; 6 – блок питания; 7 – контрольный осциллограф [1]

Важной частью установки является предварительный усилитель, который должен обладать низким уровнем собственного шума в исследуемом диапазоне частот и обеспечивать требуемую чувствительность.

Блок малошумящего предварительного усилителя содержит также RC -фильтр нижних частот (ФНЧ), как правило, 3-го порядка, который необходим для подавления во входном сигнале АЦП составляющих с частотами выше $f_d/2$ (f_d — частота дискретизации), и который преобразует сигнал в цифровую форму.

В монографии [1] рассмотрены особенности цифровой экспериментальной установки, позволяющей обработать сигналы НЧ шума методом дискретного преобразования Фурье (рисунок 1.6).

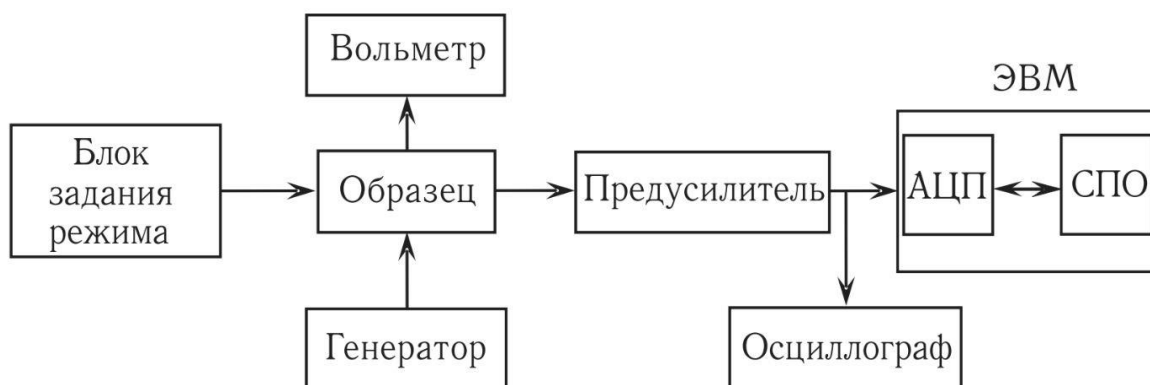


Рисунок 1.6 - Структурная схема установки для измерения спектров низкочастотных шумов с помощью ЭВМ [1]

Шум исследуемого образца с помощью АЦП преобразуется в цифровую форму с выбранным периодом дискретизации T_d (см. рисунок 1.7).

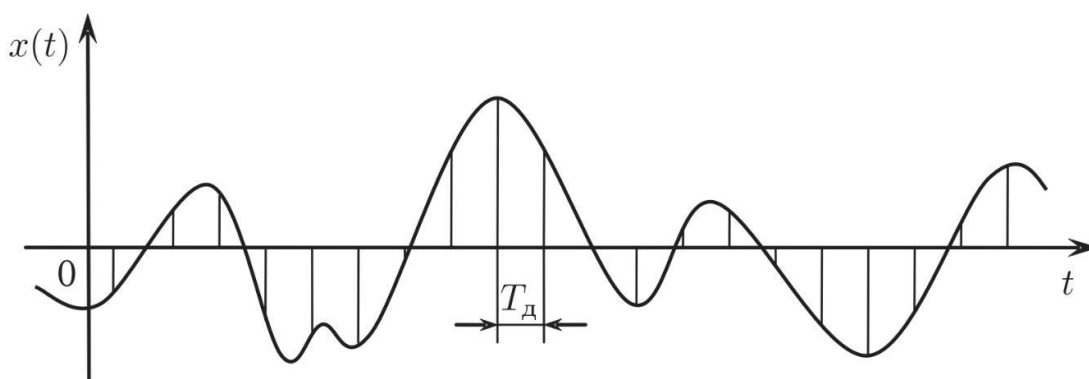


Рисунок 1.7 – Дискретное представление непрерывной реализации случайного процесса $x(t)$ с периодом дискретизации T_d : вертикальные линии дают дискретную функцию времени, полученную из непрерывной функции $x(t)$ [1]

При использовании ПФ для исследуемого шума получают график распределения СПМ шума по частотам (энергетический спектр). Обработка цифровых рядов с целью вычисления энергетического спектра осуществляется с помощью специального математического программного обеспечения (например, пакетов программ Mathcad или Matlab).

Математическая обработка - расчет параметров шума производится с помощью ПФ после того, как выборка передана в ЭВМ. Результаты могут быть представлены в виде графика, построенного в двойных

логарифмических координатах для непосредственного наблюдения энергетического спектра в реальном времени либо в виде файла, содержащего амплитуды спектральных составляющих. В Mathcad встроены пакеты, включающие большое количество дополнительных функций, расширяющие возможности обработки данных.

Проблема разрядности АЦП решается в каждом конкретном случае и зависит от уровня сигнала, который нужно оцифровывать с его помощью. Следует заметить, что низкая разрядность АЦП ограничивает чувствительность установки.

Рассмотрим далее основные особенности некоторых экспериментальных установок, описанных в научно-технической литературе.

Типовой способ измерения спектров электрического шума представлен на рисунке 1.8. Источник шума соединяется с фильтром верхних частот (ФВЧ), который пропускает частоты свыше 0,1 Гц и отфильтровывает частоты ниже этого значения. ФВЧ также выполняет две полезные функции: устраняет постоянную составляющую источника шума и обеспечивает беспрепятственное прохождение переменного (шумового) сигнала на вход малошумящего предусилителя, частота которого выше частоты среза фильтра.

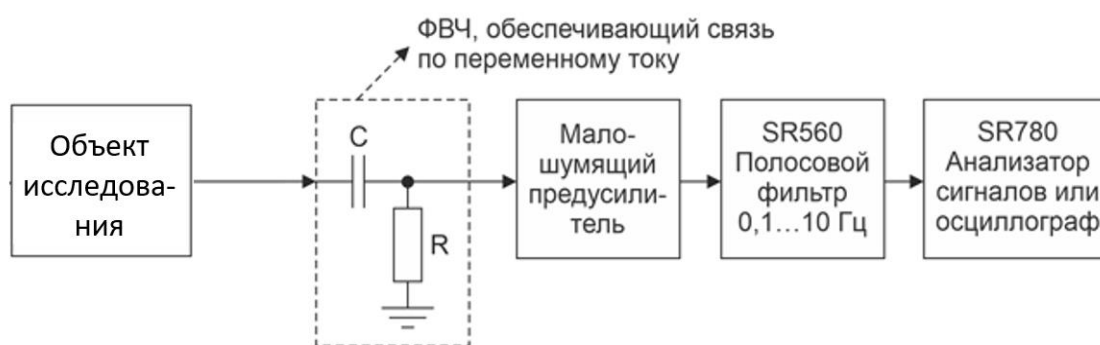


Рисунок 1.8 - Типовая схема измерения спектров низкочастотных шумов [25]

Существуют конструктивные особенности, которые влияют на производительность вышеупомянутой схемы и даже ограничивают ее [25].

- Для обеспечения более низкой частоты среза ФВЧ требуется высококачественный и дорогой конденсатор больших размеров с малыми токами утечки.
- Фликкер-шум резистора, установленного на входе, и шумы тока на входе малошумящего предусилителя суммируются и определяют уровень низкочастотного шума, создаваемого этим резистором. Следовательно, резистор меньшего номинала будет производить меньше шума. Однако более низкое сопротивление требует большей емкости конденсатора для обеспечения требуемой частоты среза ФВЧ.
- Шум, создаваемый ФВЧ, является критическим, поскольку он суммируется с шумом на входе предусилителя. Результирующий шум на входе предусилителя должен быть значительно меньшим, чем шум исследуемого образца.

В экспериментальной установке, схема которой приведена на рисунке 1.9 [26], использованы два идентичных эталонных источника напряжения для точного определения их низкочастотного шума. Это косвенный метод измерения НЧ шума. Он основан на предположении, что два разных устройства (из одной производственной партии) демонстрируют очень похожие шумовые характеристики, в то время как их шум не коррелирован.

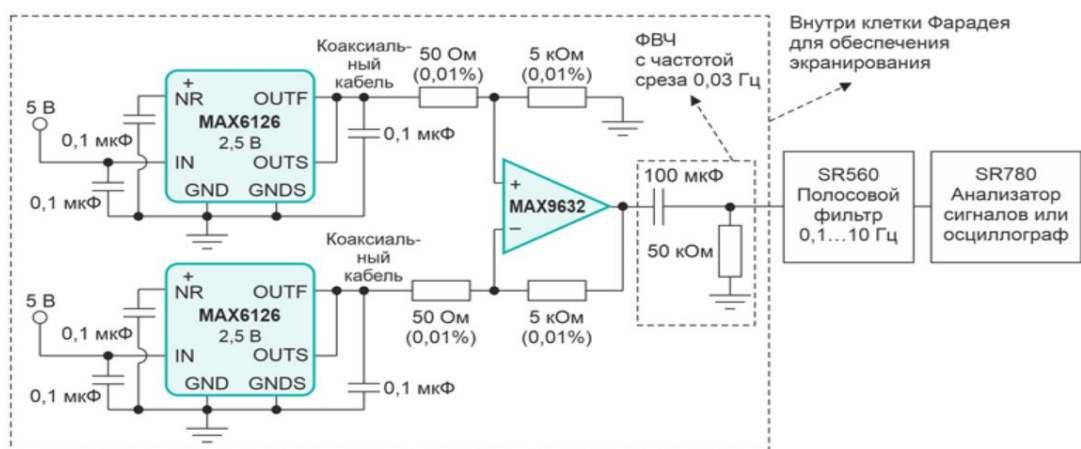


Рисунок 1.9 - Схема установки для оценки характеристик источника шума методом сравнения [26]

На рисунке 1.10 приведена схема установки, которая используется для оценки частотной характеристики схемы измерения шума, приведенной на рисунке 1.9. В этом случае тестовый сигнал подается на один вход дифференциального усилителя, а другой вход подключен к земле.

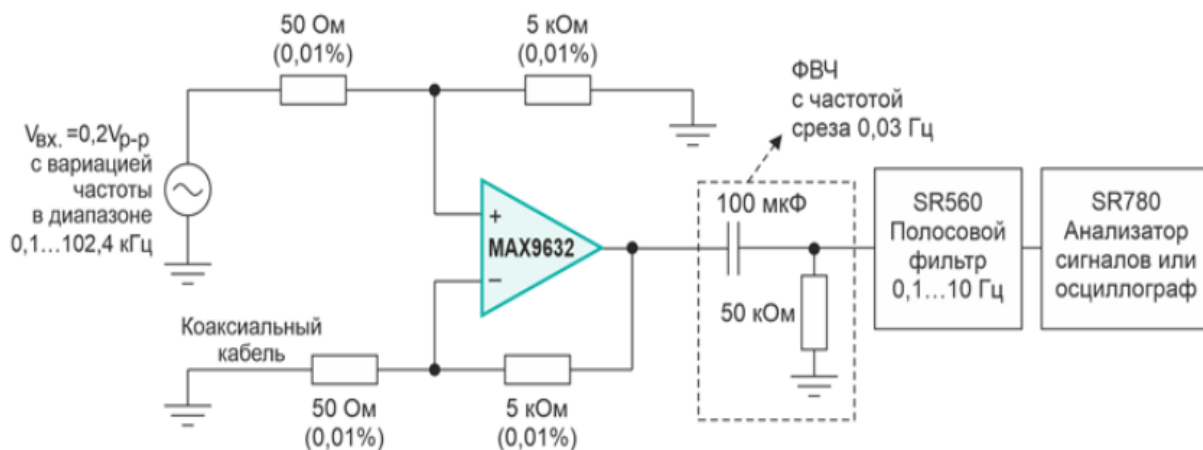


Рисунок 1.10 - Тестовая схема для измерения частотной характеристики схемы, приведенной на рисунке 1.9 [26]

Для получения точных данных при измерении спектров НЧ шума необходимо уделять должное внимание измерительным усилителям [7-9, 27, 28]. На рисунке 1.11 приведена схема малошумящего усилителя, разработанного и используемого для измерения спектров НЧ шума [7, 28].

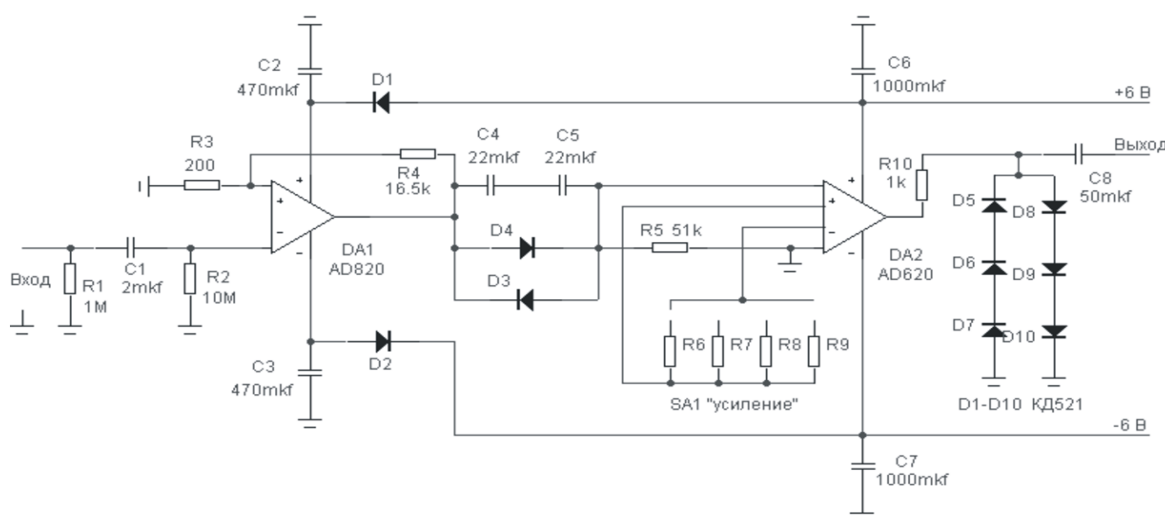


Рисунок 1.11 - Схема малошумящего усилителя [28]

Входной каскад усилителя, схема которого приведена на рисунке 1.11, построен при помощи операционного усилителя AD820 с низким собственным шумом, включенным по схеме неинвертирующего усилителя. Через резистор сопротивлением 1 Мом неинвертирующий вход подключен к нулевому потенциалу. При помощи этого резистора достигнуто необходимое входное сопротивление установки на низких частотах. Исследуемая обратно смещенная высокоомная барьерная структура представлена автором [28] эквивалентным генератором тока. Реальное сопротивление такого генератора составило $R_g = 10^7 - 10^9$ Ом. В качестве необходимого условия работы структуры в режиме генератора тока автором указана малая величина сопротивления нагрузки, т.е. $R_n \ll R_g$. В данном случае сопротивление нагрузки определено как входное сопротивление усилителя. Установлено, что оптимальное входное сопротивление составляет 1 Мом, поскольку значительное уменьшение величины R_n приводит к уменьшению чувствительности установки [28].

Второй каскад усилителя построен при помощи прецизионного инструментального усилителя AD620 DA2 с коэффициентом усиления 24000 при нижней граничной частоте 0,1 Гц. Коэффициент усиления второго каскада изменялся ступенчато с помощью переключателя SA1 [28, 29].

В научно-технической литературе неоднократно отмечалось, что существует проблема наложения собственного шума типа $1/f$ усилителей на реальный сигнал от измеряемого образца. На рисунке 1.12 представлен график спектральной плотности напряжения шума операционного усилителя ADA4622-2, на котором можно выделить две характерные области. Левая часть графика – область $1/f$ шума, а в правой части графика преобладает широкополосный шум [30].

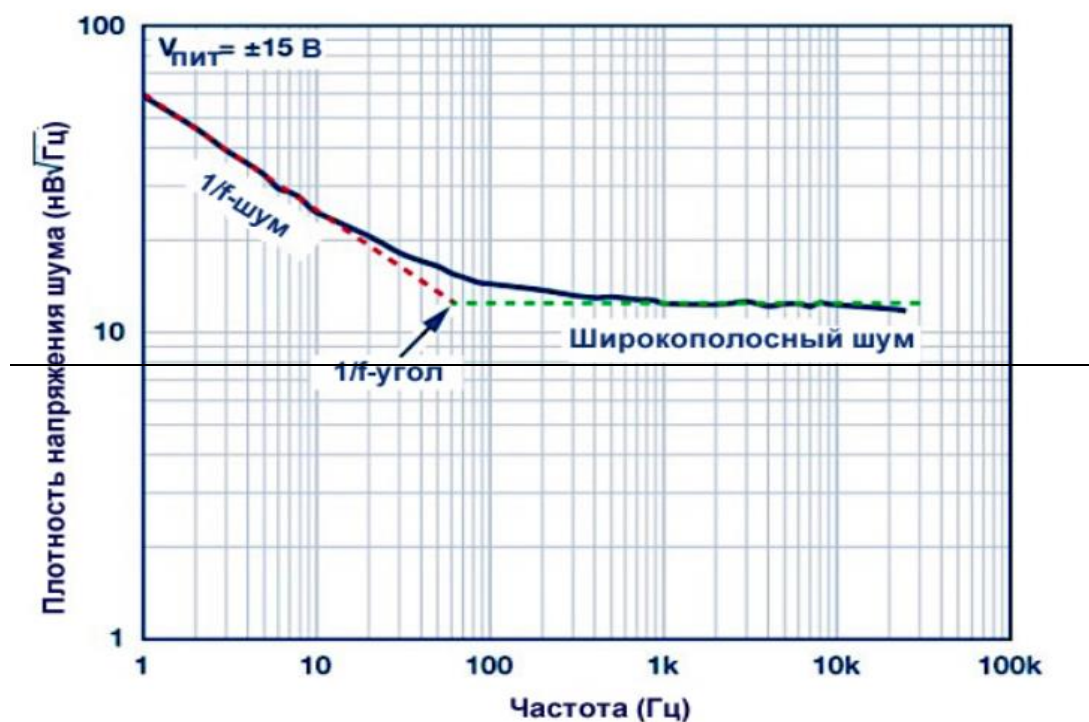


Рисунок 1.12 - График спектральной плотности напряжения шума операционного усилителя ADA4622-2 [30]

При проектировании усилительного тракта измерительной установки необходимо обеспечивать чистоту исходного сигнала и бороться с его искажениями на элементах схемы. Многие операционные усилители в той или иной степени оказывают влияние на получаемый сигнал после усиления. Для минимизации погрешностей в процессе измерения существуют методы борьбы с собственным шумом типа $1/f$ в операционных усилителях. Например, часто используется стабилизация прерыванием (chopper stabilization, chopping) – это один из методов уменьшения напряжения смещения усилителя. Однако, поскольку $1/f$ шум – низкочастотный шум, близкий к постоянному напряжению, этот метод также помогает эффективно бороться и с ним. В усилителях со стабилизацией прерыванием (чопперные усилители) входной сигнал коммутируется с определенной частотой, а на выходе происходит его обратное восстановление. Работа схемы эквивалентна процессам модуляции и демодуляции (рисунок 1.13).

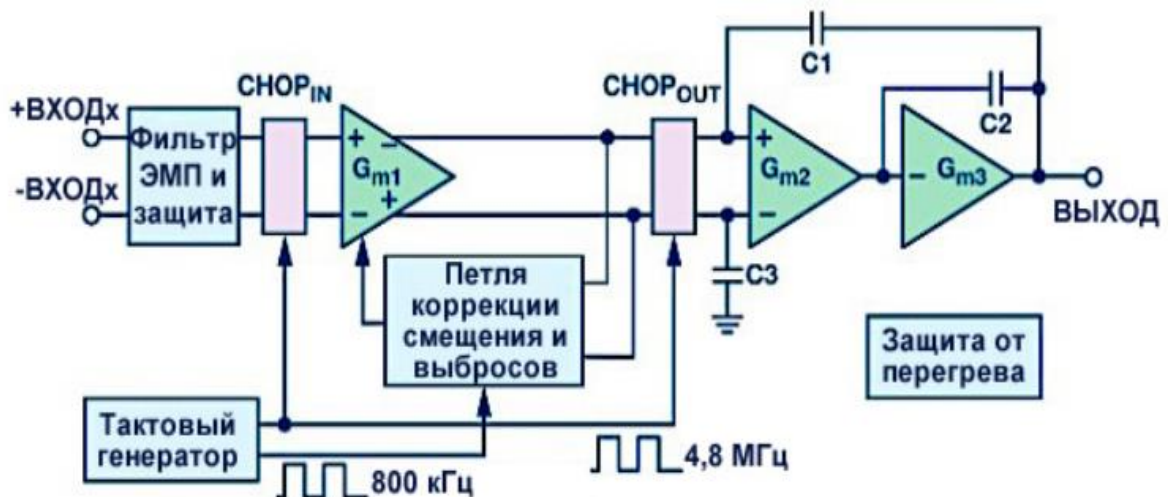


Рисунок 1.13 - Структурная схема чопперного операционного усилителя ADA4522 [30]

Анализ структурной схемы ADA4522 (рисунок 1.13) показал, что модуляция входного сигнала частотой прерывания (chopping frequency) производится в блоке CHOPIN. Блок CHOPOUT выполняет синхронную демодуляцию сигнала с возвращением к его исходной частоте и одновременно выполняет модуляцию входного напряжения смещения и $1/f$ шума входного каскада ОУ частотой прерываний. Кроме снижения напряжения смещения, в чопперных усилителях уменьшается зависимость напряжения смещения от синфазного напряжения, что позволяет достичь очень высокой линейности по постоянному напряжению и высокого коэффициента подавления синфазного сигнала (CMRR, common-mode rejection ratio) [30].

Стабилизация прерыванием также уменьшает зависимость напряжения смещения от температуры. По этой причине чопперные усилители часто называют усилителями с нулевым дрейфом. Важно отметить, что усилители с нулевым дрейфом устраняют только $1/f$ шум усилителя. Фликкер-шум от любых других источников, таких как исследуемые образцы, будет проходить через усилитель без изменений.

Низкочастотный $1/f$ шум способен ограничить эффективность любой прецизионной измерительной низкочастотной схемы. Тем не менее, этот шум может быть удален различными способами, такими как стабилизация прерыванием и переменное возбуждение. Эти методы имеют свои недостатки, с которыми удастся успешно бороться в современных усилителях и Σ - Δ АЦП, в результате чего спектр приложений для компонентов с нулевым дрейфом становится все шире [30].

Помехи при измерениях низкочастотных шумов и способы борьбы с ними. В научно-технической литературе широко изучается проблема снижения уровня помех при исследовании НЧ шума электронных компонентов [1, 9, 31, 32]. Авторами [31], например, рассмотрены алгоритмы измерения мощности компонентов смеси шумового сигнала и помех путем функциональных преобразований входной смеси в тракте после детекторной обработки, исследованы случаи узкополосных и импульсных помех.

При измерениях случайных флуктуационных процессов величина предельно различимого слабого уровня шума определяется, прежде всего, собственным шумом предварительного усилителя. Кроме того, собственный шум предварительного усилителя, снижает и точность измерительной установки. Кроме собственных шумов предварительного усилителя, на величину предельно различимого слабого сигнала шума влияют и внешние помехи — паразитные наводки, которые часто превосходят уровень собственных шумов усилителя и даже измеряемых сигналов. Внутренние шумы усилителя возникают при прохождении тока через пассивные и активные элементы схемы. Их можно только снизить путем выбора транзисторов или ИС, имеющих низкий уровень собственных шумов в требуемом диапазоне частот, а также путем выбора соответствующего режима их работы. Кроме шумов транзисторов или ИС, необходимо знать и другие источники внутренних шумов в усилителе, возникающие в пассивных элементах электрической схемы усилителя.

При разработке усилителя с низким коэффициентом шума, кроме оптимального выбора электрической схемы с применением малошумящих транзисторов, важно правильно подобрать всю элементную базу усилителя (резисторы, конденсаторы и др.), а также оптимизировать режимы работы каскадов, особенно первого [1].

Шумы усилителей обычно разделяют в соответствии с источником их возникновения: внутренние и внешние. Последние попадают на вход усилителя в результате наводок от работающих вблизи мощных устройств, например, радиопередатчиков, электромоторов или же из-за проникновения выходного сигнала схемы на вход через паразитные емкости в самом усилителе. И если с помехами и наводками, вызванными внешними причинами, можно бороться с помощью фильтрации сигнала и выполнения удачной конструкции (оптимального расположения элементов и хорошей разводкой проводников, а также экранированием схемы), то от внутренних шумов, возникающих в процессе усиления сигнала, полностью избавиться не удается [1].

Уровень внешней сетевой помехи с частотой электрической сети может превышать исследуемые шумы в 1000 и более раз. Наводка от сети имеет спектр в виде пика на частоте 50 Гц (или гармоник частоты сети — ряда пиков на частотах кратных частоте 50 Гц) с относительно постоянной амплитудой.

Для исключения сетевой помехи применяют экранирование и заземление. Часто используют металлические экраны, монтаж схемы выполняют проводами в экранирующей оплетке и в отдельных случаях снижают полное сопротивление входной цепи насколько это возможно. Провода с сигналами низкого уровня, в частности при высоком уровне полного сопротивления, рекомендуют экранировать, что позволяет избавиться от многих источников помех.

Кроме общего экранирования, автор [1] рекомендует все провода во входных устройствах и предварительном усилителе делать как можно

короче. Различные виды помех можно уменьшить или исключить практически полностью путем продуманного расположения проводов при монтаже измерительных блоков и элементов схемы, включая также фильтрацию по цепи питания [1].

Магнитное экранирование может оказаться желательным при работе с сигналами очень низкого уровня или с устройствами, чувствительными к магнитным наводкам (катушки индуктивности, проволочные резисторы). Кроме того, при исследовании шумов в ферромагнитных материалах, магниточувствительных датчиках (магнитотранзисторы, магнитодиоды, магнитометры и др.) магнитное экранирование необходимо в обязательном порядке.

Для ослабления помех от внешних магнитных полей (в частности, от магнитного поля Земли) используют специальные магнитные экраны, которые изготавливаются из магнитномягкого материала с высокой магнитной проницаемостью $\sim 10^4 - 10^5$, например, из железа или пермаллоя с толщиной стенок около 1 мм [1]. Действие экранов основано на том, что магнитный поток от внешних источников шумов концентрируется в стенках экрана, выполненного из материала с высокой магнитной проницаемостью, чем обеспечивается резкое снижение внешнего магнитного поля (постоянного и переменного) в объеме такого экрана.

Но даже при создании самой тщательной экранировки исследование шумов в электронных приборах на низких частотах рекомендуется проводить на частотах измерения, не кратных частоте электрической сети, равной 50 Гц [1].

1.3 Физические модели низкочастотного шума

Основная сложность в объяснении природы $1/f^\beta$ шума основана на определении физических механизмов его генерации на низких частотах. Существует большое количество работ, посвященных этой проблеме. Шум

со спектром $1/f^\beta$ вездесущ: обнаружен в проводниках и сверхпроводниках, полупроводниках, диэлектриках, практически во всех исследованных электронных компонентах и даже биофизических и социальных системах.

В настоящее время порядок величины и частотная зависимость 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.

Существуют два основных подхода к описанию механизма генерации НЧ шума. Первый, получивший достаточно широкое распространение, основан на формальном описании отдельных составляющих НЧ-шума при помощи математического аппарата и (или) эквивалентных электрических схем [1, 2, 6, 12, 13, 20, 32-37] и др. Предпринимаемые попытки создания теоретических моделей ставят целью выявить такое аналитическое описание физического процесса, которое приводило бы в конечном итоге к соотношению вида $S \sim 1/f^\beta$. Например, для получения спектра вида $1/f^\beta$ иногда используют представление случайного процесса в виде пуассоновской последовательности импульсов [13, 32]. Математически $1/f^\beta$ -спектр может быть получен из белого (теплого) шума с помощью интегрирования дробного порядка [2, 13, 32]. Несмотря на определенные успехи, достигнутые в этом направлении, далее в настоящем разделе указанный подход рассматриваться не будет, т.к. основная наша задача – анализ физической сущности явления. Такой анализ и составляет основу второго, «физического» подхода к описанию механизма генерации НЧ шума.

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.

Считается, что математическая зависимость $S(f) \sim 1/f^\beta$ не может быть получена в предположении простого релаксационного процесса с единственным временем релаксации τ . Ван-дер-Зил [3, 38] показал, что описываемый спектр может быть получен при помощи суперпозиции множества лоренцианов с разными постоянными времени. Жигальский [1, 13] указал, что требуемое распределение получается, если процессы, ответственные за НЧ шум, активационные. Для строгого выполнения закона $1/f^\beta$ функция распределения энергии должна быть непрерывной, хотя спектр с удовлетворительной точностью может моделироваться и дискретным набором процессов.

Коган в [12] отметил, что единственным объяснением природы генерации $1/f$ -шума, против которого в настоящее время нет прямых возражений, является механизм, связанный с наличием в объектах разнообразных релаксационных процессов с широким спектром времен релаксации τ . Диапазон изменения величины τ охватывает много порядков [2, 12, 13] и др. Экспоненциально широкое распределение постоянных времени τ , по мнению авторов [39], обусловлено многофононным механизмом захвата носителей на уровни в хвостах плотности состояний. Эти релаксационные процессы часто связывают с кинетикой различных дефектов структуры твердого тела: вакансий, примесей и дислокаций [3, 5, 6, 9, 10, 12, 15, 20, 33, 36, 37] и др. Весомым аргументом в пользу такого механизма генерации НЧ шума является значительное его снижение в случае применения специальных методов геттерирования дефектов [40]. На связь шума вида $1/f$ с дефектами структуры твердых тел (в том числе – с неконтролируемыми дефектами) указывает тот факт, что образцы, изготовленные по одной и той же технологии и имеющие близкие электрофизические параметры, часто обнаруживают спектральную плотность мощности НЧ-шума, отличающуюся на порядок и более [12].

Для понимания природы и анализа существующих теорий НЧ шума большое значение имеет до настоящего времени не решенный вопрос его

стационарности. В этой связи на сегодняшний день существуют два основных направления разработки моделей, объясняющих генерацию $1/f^\beta$ шума в проводниках.

Первое направление включает теории, в которых предложены равновесные модели со стационарным шумом. При этом полагают, что в диапазоне частот от f_l до f_h имеет место спектр $1/f^\beta$. Теории объясняют температурную зависимость шума и границы частотного диапазона.

Отметим, что для всех стационарных моделей шум вида $1/f^\beta$ имеет место в ограниченном интервале частот от f_l до f_h . Этот факт можно рассматривать как следствие термодинамических ограничений, которые накладываются на механизм шума. Термодинамика не допускает существования шума с $1/f$ -спектром в неограниченном диапазоне частот.

Второе направление включает теории, основанные на деградационных моделях, которые описывают нестационарные процессы.

К первому направлению относятся модели «экспоненциально широкого распределения времен релаксации». Они трактуют $1/f$ шум как суперпозицию случайных релаксационных процессов, который характеризуются распределением времени релаксации τ .

Спектральную плотность флуктуаций можно получить путем интегрирования функции со статистическим весом $g(\tau)$ – плотностью распределения постоянных времени:

$$S_z(f) = \int_0^{\infty} g(\tau) \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau . \quad (1.12)$$

Если механизм возникновения $1/f$ шума активационный, то распределение весовой функции подчиняется закону

$$g(\tau) = \frac{1}{\tau} . \quad (1.13)$$

Если энергия активации E_a равномерна в широком интервале энергий от E_1 до E_2 , имеем

$$f_{l,h} = f_0 \exp\left(\frac{-E_{2,1}}{kT}\right) . \quad (1.14)$$

Модель экспоненциально широкого распределения энергии активации

впервые применена Ван дер Зилом и Дю Пре для описания $1/f$ шума в полупроводниках. В работе Датта и др. [41] показано, что для металлических пленок распределение энергии активации не равномерно, поэтому имеется отклонение показателя формы спектра β от ожидаемого.

К наиболее общим свойствам избыточного низкочастотного шума авторы обзора [42] относят то, что он всегда выступает как спутник стационарно протекающих необратимых процессов. Его вклад исчезает из спектров функций электрического тока или потенциала, когда исчезают необратимые потоки, в которых происходит перенос заряда, и система переходит в термодинамически равновесное состояние [42]. В [43] указано, что генерация НЧ шума является в основе своей неравновесным процессом, связанным с переносом заряда.

Большинство авторов, изучавших особенности НЧ шума (фликкер-шума) в различных объектах (см., например [1-3, 13, 16]), полагают, что указанный процесс является стационарным, поскольку в экспериментальных исследованиях никакого проявления нестационарности шума замечено не было. Интенсивность НЧ шума ряда различных полупроводниковых приборов оставалась неизменной (в пределах погрешности измерений) в течение нескольких лет [13]. Букингом в [2] 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 [44] 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.

Многие авторы отмечают экспериментальный факт: избыточный шум наблюдается только при протекании через исследуемый объект

электрического тока (его иногда называют «токовым» шумом) [2]. Это указывает на необходимость описания НЧ-шума как результата движения носителей заряда, создающих этот ток.

Важными чертами указанной проблемы являются вопросы, остающиеся дискуссионными на протяжении не одного десятилетия: является ли низкочастотный шум результатом флуктуаций концентрации свободных носителей заряда или их подвижности; высоты потенциального барьера или толщины обедненной области; эффектом объемным или поверхностным и т.д.

Пеллегрини в [45] показано, что пространственные некоррелированные флуктуации подвижности, независимо от их физического механизма, не могут существовать без локальных флуктуаций общей плотности носителей. В [43] отмечено, что модели флуктуаций числа носителей и флуктуаций подвижности в определенной мере «перекрываются» друг с другом, так как, например захват носителей на ловушки должен приводить к флуктуациям их эффективной подвижности.

Анализ показал, что в конечном итоге природа генерации $1/f^{\beta}$ шума так или иначе связана с процессами деградации объекта, разупорядоченности, наличием нарушений структуры, а также флуктуаций физических параметров [1, 6, 10, 15, 16] и др.

Можно выделить ряд общих механизмов возникновения флуктуаций проводимости однородных проводников и полупроводников: флуктуации числа носителей и их подвижности, температуры, геометрических размеров образца; диффузионная перестройка кристаллической решетки, химические реакции в твердой фазе, рождение и аннигиляция микродефектов в кристаллической решетке и др.

Обобщенная активационно-дрейфовая модель, разработанная Орешкиным с соавторами [46-48] и др., удовлетворяет общим принципам генерации НЧ шума в полупроводниках и позволяет избежать ряда противоречий, указанных в [49-51].

Модель двухуровневых систем, исследованная Якимовым применительно к туннельным контактам и пленкам металлов, подразумевает, что высоты локальных энергетических барьеров твердого тела являются случайными величинами [16, 44]. Применительно к пленкам металлов известна гипотеза Восса и Кларка, где говорится о связи $1/f$ шума с равновесными температурными флуктуациями [20, 52].

Многие экспериментальные данные показывают, что равновесный шум вида $1/f^\beta$ в проводниках возникает главным образом вследствие флуктуаций подвижности носителей заряда. Выделяют два механизма возникновения равновесного НЧ шума. Первый обусловлен рассеянием на фононах, второй связан с рассеянием на дефектах структуры. Для второго механизма широкий диапазон времен релаксации, требуемый для объяснения $1/f^\beta$ спектра, можно обосновать достаточно легко. Для первого, напротив, физический механизм, дающий широкий набор времен релаксации, пока не вполне ясен, хотя в работе [14] Хоуге выдвигаются аргументы, необходимые для такого объяснения.

Подтверждением справедливости моделей, описывающих процессы генерации НЧ шума в металлах под влиянием локальных и линейных нарушений структуры, авторы считают факт снижения интенсивности $1/f^\beta$ шума после отжига, а также рост после деформации [1, 10, 20, 53].

Согласно модели Миллера [54] шум вида $S(f) \sim 1/f^\beta$ в металлических пленках возникает вследствие процессов генерации и рекомбинации дефектов, в частности вакансий, на поверхности в процессе их диффузии. Предположение авторов [55] о широком распределении времен релаксации дефектов позволило получить $1/f^\beta$ спектр токового шума. Оценки интенсивности шума привели к значению параметра Хоуге $2 \cdot 10^{-3}$, удовлетворительно согласующемуся с наблюдаемыми в металлических пленках.

Для описания процессов формирования шума вида $S(f) \sim 1/f^\beta$ предложен ряд моделей, в которых флуктуации проводимости проводниковых материалов обусловлены рассеянием носителей заряда на вакансиях.

В работах Жигальского [1, 13, 20] и др. приведены доказательства того, что для процесса генерации шума в металлических пленках вакансии имеют наибольшее значение среди различных типов дефектов, поскольку для их возникновения и миграции требуется относительно небольшая энергия. Кроме того, перестройка, движение других видов дефектов также происходят при участии вакансий.

Кристаллическая (поликристаллическая) структура проводников неоднородна. Имеются различные виды источников (стоков) вакансий, неравномерно распределенных по объему. Вакансии могут рождаться под действием тепловых колебаний и исчезать. Внутренняя энергия образования вакансий различна для каждого из источников – требуется различная энергия для разрыва связей атома при его расположении на границе зерна, дислокации или выступа, на поверхности поры, межфазной границы и др. [1]. Кроме того, внутри и особенно на границах зерен, межфазных границах существуют микронапряжения, которые могут быть распределены неравномерно и приводить к непрерывному распределению энергий активации и миграции вакансий. Случайность энергии активации является следствием многообразия несовершенств структуры. В реальных пленках металлов большой набор времен релаксации, связанных с механизмом рождения и уничтожения вакансий, существует как результат неоднородного распределения стоков в объеме.

Среднее расстояние между источниками вакансий определяет время жизни вакансий, при этом среднее число скачков вакансий n от момента рождения до ее гибели может быть велико, достигая, например, для равновесных вакансий в алюминии $n = 8 \cdot 10^7$. Вклад вакансий $\rho(t)$ в удельное сопротивление определяется выражением [56]:

$$\rho(t) = A \frac{N_v(t)}{N_a}, \quad (1.15)$$

где t - время, A – коэффициент пропорциональности, N_v – число вакансий в образце, N_a – число атомов в образце.

Спектр флуктуаций напряжения на образце определяется спектром флуктуаций числа вакансий [13]:

$$S = \frac{A^2}{\rho_f^2 N_a^2} S_{Nv}(f), \quad (1.16)$$

где $S_{Nv}(f)$ – спектральная плотность флуктуаций числа вакансий в металлическом образце.

СПМ шума при протекании тока I_0 определяется спектром Лоренца – Дебая [1, 3]:

$$S_U(f) = 4 \overline{\Delta R^2} I_0^2 N_v \frac{\tau_{v0}}{1 + \omega^2 \tau_{v0}^2}, \quad (1.17)$$

где $\overline{\Delta R^2}$ – дисперсия флуктуаций сопротивления образца.

Спектр флуктуаций, описанный выражением (1.17), связанный с термически активируемыми вакансиями, наблюдался экспериментально Келаско и др. в пленках алюминия с однородной микроструктурой и со средним размером зерен около 0,5 мкм [57]. На низких частотах наблюдался шум со спектром $S(f) \sim 1/f^\beta$ где $\beta > 2$. Расчет энергии «размытия» энергий активации [1] дает значение примерно 0,2 эВ, что сравнимо с энергией, приходящейся на одну связь в кристалле. Этот результат позволяет объяснить непрерывный спектр энергий активации дефектов в проводящих образцах от долей эВ до нескольких эВ и соответствующих времен релаксации, необходимый для получения спектра $S(f) \sim 1/f^\beta$ в широком диапазоне частот.

В работе [1] указано, что мелкое зерно поликристаллической структуры проводникового материала приводит к росту СПМ НЧ шума. Уменьшение размера зерна в 2 раза приводило к росту мощности шума на 3-4 порядка.

Другое направление разработки моделей, объясняющих генерацию $1/f^\beta$ шума в проводниках, основано на гипотезе, согласно которой избыточный шум имеет неравновесную деградиционную природу. В работах А.В.Якимова и др. [58-60] предполагается, что все объекты, обладающие флуктуациями физических свойств, находятся в термодинамически неравновесном состоянии, т.е. состоянии старения.

Применительно к пленкам проводников, которые обладают структурной неравновесностью, в [58] предложена модель диффузионной перестройки структуры. НЧ шум трактуется как нестационарный случайный процесс, обусловленный диффузионной деградиацией объекта. Установлено, что спектр этих флуктуаций имеет вид $S(f) \sim 1/f^\beta$, где $\beta = 3/2$. Теория связывает механизм генерации шума с процессами физической сорбции и десорбции газов из окружающей среды. И хотя адсорбционный механизм $1/f$ шума при определенных условиях может проявляться, но с помощью его не удастся объяснить многие экспериментальные результаты. Если структура стабильна, например, в отожженных образцах, $1/f^\beta$ шум не может быть объяснен процессами структурной перестройки.

В работе [59] предложена модель, согласно которой в проводящих объектах, термодинамически неравновесных вследствие наличия градиентов концентрации примесей, точечных и линейных дефектов структуры, возникают избыточные флуктуации концентрации носителей заряда. Установлено удовлетворительное согласие модели с экспериментальными результатами [60]. Диффузия примесей и дефектов в термодинамически неравновесных проводящих объектах, по мнению авторов, является причиной их старения, приводит к генерации избыточных флуктуаций проводимости и позволяет в итоге получить спектр НЧ шума вида $S(f) \sim 1/f^\beta$, не имеющий ограничений по частоте снизу.

Авторы [58] пришли к выводу, что фликкерные флуктуации, сопровождаемые ростом энтропии объекта, обусловлены стохастичностью термодинамических процессов и являются неотъемлемым свойством

термодинамически неравновесных процессов. Модели, основанные на связи фликкерного шума с процессами деградации и старения объектов, разработаны Врачевым [61, 62], Поляковым [63].

Приведенные результаты свидетельствуют о важной роли дефектов структуры материалов в процессах формирования избыточного шума.

1.4 Прогнозирование надежности электронных компонентов по параметрам низкочастотного шума

Выход годных электронных компонентов является важнейшей проблемой промышленности. Для выявления потенциально ненадежной продукции применяют самые различные испытания с последующим измерением параметров.

Часто эти меры сводятся к попыткам активизировать скрытые дефекты компонента (прибора, модуля) до того, как он попадет к потребителю. Это могут быть различные варианты термотренировки, электротермотренировки, энергоциклирования и т. д. Компонент подвергается значительным нагрузкам (температурным, электрическим, экстремальным переходным процессам). Такие воздействия заставляют проявиться скрытые дефекты компонента [10]. В ряде случаев после подобных воздействий скрытые дефекты превращаются в явные. В этом случае потенциально ненадежные компоненты либо отказывают, либо их характеристики недопустимым образом изменяются.

Такие способы контроля качества и диагностики потенциальной надежности электронных компонентов давно и вполне успешно применяются. Однако для подобной диагностики требуются большие затраты времени. Оно составляет десятки, даже сотни часов [10]. Большие потери времени усложняют и удорожают производство электронных компонентов, затрудняют своевременную реакцию на сбои в технологическом процессе. Возникает соблазн уменьшить временные потери за счет более интенсивного воздействия на компонент. При этом скрытые дефекты проявятся быстрее, но

могут появиться новые за счет высокой интенсивности воздействия. Возможны даже отказы исправных компонентов [10].

Авторами многих опубликованных работ установлено, что применение шумовых измерений для прогнозирования потенциальной надежности электронных компонентов позволяет решить указанную проблему.

Как отмечено ранее, несмотря на давнюю историю изучения и широкую распространенность шума вида $S(f) \sim 1/f^\beta$, исследователи признают, что его природа неизвестна в подавляющем большинстве объектов, где он наблюдается [64]. В каждом конкретном случае можно найти особую причину возникновения этого вида шума. Анализ, проведенный в разделе 1.3, позволяет сделать вывод о том, что наиболее общей причиной возникновения шума вида $S(f) \sim 1/f^\beta$ электронных компонентов являются скрытые дефекты.

Сравнивая характеристики $1/f^\beta$ шума однотипных компонентов, можно оценить их относительную надежность. В работе Разуменко [10] приведен такой пример. Параметры партии произведенных электронных компонентов (транзисторов, диодов, резисторов и т. д.) соответствуют заданным пределам. Для каждого компонента произведено измерение $1/f$ шума. Некоторые компоненты имеют уровень $1/f$ шума, который значительно выше, чем средний. Можно ли утверждать, что вероятность отказа таких компонентов также значительно выше? Автор [10] отвечает утвердительно, поскольку результаты многочисленных экспериментов позволяют говорить об этом вполне уверенно. При желании можно подвергнуть эту «подозрительную» группу компонентов испытанию на надежность. Например, так, как это сделано в [65] или [66]. Результаты таких экспериментов свидетельствуют об одном: повышенный уровень $1/f$ шума является признаком критического (предотказного) состояния.

Как правило, основными характеристиками НЧ шума являются значение СПМ на определенной низкой частоте, либо величина показателя формы спектра β . В работе [20] указано, что показатель β , названный

Жигальским параметром нелинейности и показателем формы спектра, увеличивается в термодинамически неравновесных объектах с высокой концентрацией дефектов и может достигать 2-3. Для пленок *Cr* сразу после их осаждения значение β оказался равным 2,5-3, после выдержки в вакууме – 0,7-1,2 [20].

В работах авторов [67-69] отмечено, что значение показателя формы спектра НЧ шума, используемое в качестве диагностического параметра, может изменяться в широких пределах: от 0,5 до 3 и более и сильно влияет на погрешность измерения СПМ НЧ шума. Указано, что оценок погрешности измерения параметра β с учетом влияния белого шума компонентов и рекомендаций по выбору оптимальных условий измерения параметра β и СПМ для целей контроля их качества в литературе не приводится. Автором предпринята попытка оценки погрешностей измерения показателя формы спектра, однако примеров практической реализации предложенной методики в опубликованных работах обнаружить не удалось.

Авторами [22, 70-72] предложено использовать вольт-шумовые характеристики для отбраковки потенциально ненадежных полупроводниковых приборов как наиболее информативные.

В работе [72] установлено, что зависимость шумового тока от приложенного обратного смещения фотодиодов в диапазоне от 1 до 10 В описывается степенной функцией $I_{ш} \sim U_{ш}^\gamma$. При этом показатель степени γ может служить в качестве критерия отбраковки приборов по совокупности значений падения напряжения при прямом включении, напряжения пробоя и обратного тока при комнатной температуре. Величина γ , большая 0,3, по данным авторов [22, 72], свидетельствовала о том, что прибор должен быть отбракован, поскольку не удовлетворяет техническим нормам по какому-либо параметру.

В обзоре [6] выявлена корреляция между уровнем избыточного шума, измеренного в темновом режиме, и концентрацией ГУ, а также уровнем

интегрального энергетического шума в рабочем режиме для детекторов ядерных частиц и γ -излучения барьерного типа.

Установлено, что исходный уровень избыточного шума является более информативным параметром качества детекторов ядерных частиц и γ -излучения по сравнению с током утечки приборов.

Метод измерения избыточного шума использован для неразрушающего контроля качества приборов и ИС на этапе изготовления по тестовым структурам, а также готовых изделий [15, 16].

Для эффективного применения шумовой диагностики авторы большинства работ полагают, что необходимо применять специальное (часто экстремальное) воздействие с целью выявления источника потенциальной опасности отказа компонента. При этом параметры спектров НЧ шума необходимо измерять до и после воздействия. Такая комплексная диагностика, кроме исчерпывающих сведений о потенциальной надежности исследуемого компонента, позволит получить данные о природе его внутренних дефектов, их размере, локализации и степени их опасности. Примером реализации такого эксперимента является обобщенная схема НЧ шумовой диагностики, предложенная автором [10] (рисунок 1.16).

На основании полученных данных блок обработки посылает команды исполнительным устройствам, которые производят сортировку, маркировку или выбраковку исследуемых компонентов. Набранная статистика позволяет оперативно корректировать технологический процесс с целью уменьшения процента брака [10].

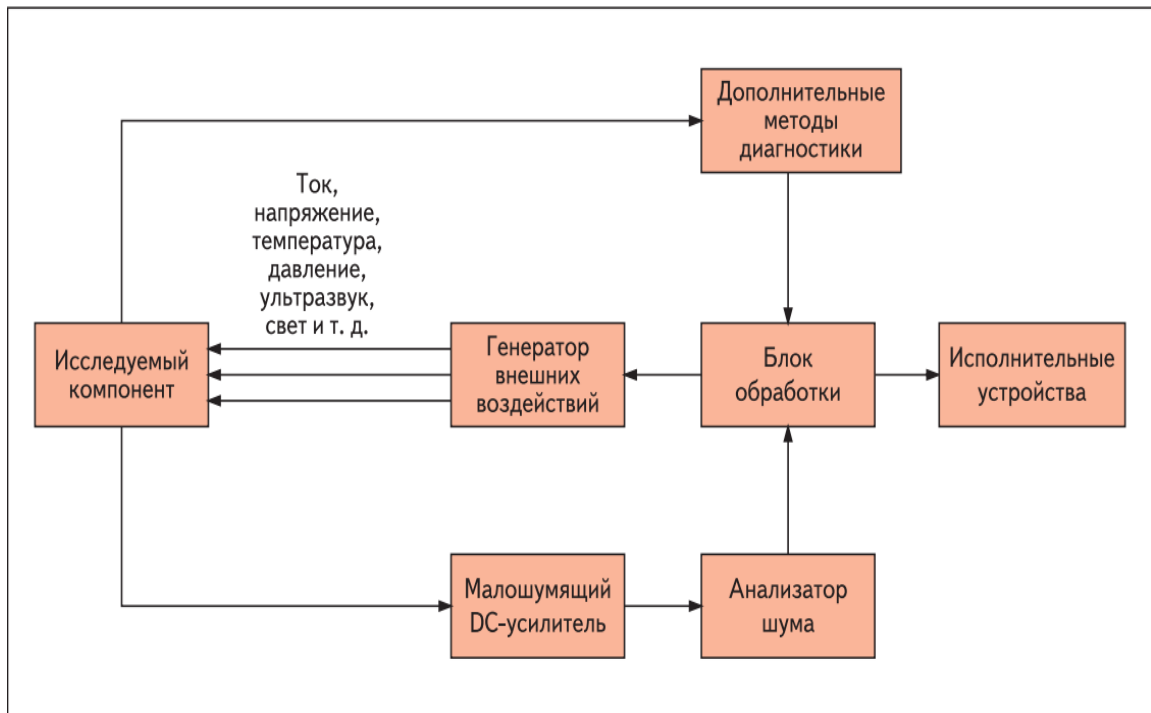


Рисунок 1.16 - Схема диагностики качества и надежности электронных компонентов по их характеристикам в области $1/f$ шума [10]

Описанный подход к прогнозированию надежности электронных компонентов можно считать весьма перспективным, несмотря на отсутствие обобщенных общепризнанных теоретических представлений о механизмах генерации НЧ шума в твердом теле и, в частности, в конкретных электронных компонентах.

В настоящее время опубликованы обзоры, в которых проанализирован накопленный практический материал о целенаправленном воздействии на различные дефекты твердых тел электрического и магнитного поля, света или лазерного излучения, деформации, температуры, ионизирующего излучения и т. д. с предшествующим и последующим измерениями спектров НЧ шума. Примером таких обзоров могут служить работы [6, 15, 16, 20] и указанная там литература.

Потенциальную ненадежность полупроводниковых изделий (диодов, транзисторов и интегральных схем) определяют по относительной величине изменения информативного электрического параметра до и после какого-

либо определенного внешнего дестабилизирующего воздействия (радиации, импульса тока или мощности, механических воздействий и т. п.). Например, в работе [65] определяли потенциальную нестабильность приборов по относительной величине изменения значения шума до и после пропускания через полупроводниковый прибор импульса тока, в 1,5-5 раз превышающего по амплитуде предельно допустимое значение.

Авторы [65] указали, что обычно способы отбраковки электронных приборов по шумам основаны на том, что исследуемые изделия сравниваются по уровню шума с контрольным бездефектным изделием и по разности значений шумов изделие оценивается на надежность. Недостатком этих способов, по мнению авторов, является низкая достоверность, так как можно отбраковать до 15% надежных изделий.

В работе [66] предложен следующий способ определения потенциально ненадежных транзисторов: измерение шумов проводилось в режиме диода переходов Э-Б и К-Б при прямом токе 10 мА с помощью установки прямого измерения, после чего сигнал детектировался квадратичным детектором и измерялся на цифровом вольтметре.

Для достаточной выборки транзисторов из партии одного типа находили разность значений шумов переходов Э-Б и К-Б для каждого транзистора. Критерий оценки разности значений шумов выбирался, исходя из разности минимального, среднего и максимального значений для двух переходов. Транзисторы, у которых разность значений шумов переходов Э-Б и К-Б оказалась больше установленного критерия, считались потенциально надежными.

Авторы объяснили указанное тем, что в едином технологическом цикле изготовления партии транзисторов шумовые параметры, зависящие от поверхностных и объемных дефектов, у приборов значительно различаются, что говорит о наличии в структуре транзисторов больших нарушений, снижающих их надежность [66].

Кроме того, с увеличением дефектности в структуре прибора уровень НЧ шума возрастает, а с ростом величины протекающего через прибор тока возрастает скорость его деградации, следовательно, и уровень НЧ шума [73]. Предложенный способ разбраковки был опробован на транзисторах КТЗ102Г [66].

Анализ результатов, опубликованных в научно-технической литературе, показывает, что для каждого вида дефектов следует подобрать такое внешнее воздействие, на которое будет отзываться только (преимущественно) данный дефект. Сам этот отклик можно зафиксировать, измеряя реакцию $1/f$ шума исследуемого компонента на выбранное специальное внешнее воздействие. Трудность заключается в выборе наиболее избирательных внешних воздействий [10].

На каждое такое воздействие должен реагировать только один вид дефектов. Эта избирательность и лежит в основе диагностики дефектов по характеристикам спектра $1/f$ шума [10]. Если примененное внешнее воздействие изменило характеристики спектра $1/f$ шума исследуемого компонента, то предположение о характере и пространственной локализации дефектов подтверждается.

Трудности применения метода шумовой диагностики обусловлены необходимостью подбора условий ее реализации в каждом конкретном случае. Можно согласиться с автором [10], перечисляющим ряд вопросов, лежащих в основе этой проблемы.

Какой величины должны быть внешние воздействия? Должны они приближаться по величине к предельно допустимым для данного компонента значениям, или, напротив, их величина должна быть минимальной? Может быть, величину воздействия необходимо менять по какому-то алгоритму? Какова должна быть продолжительность воздействия? В какой последовательности должны прикладываться эти внешние воздействия? Какой временной интервал необходим, чтобы исследуемый компонент «забыл» о предыдущем воздействии, и его реакция на следующее

воздействие была «адекватной»? Допустима ли комбинация нескольких воздействий одновременно? Без правильных ответов на эти и другие вопросы методики шумовой диагностики могут оказаться недостаточно объективными.

В заключение можно сделать вывод, что даже в сегодняшнем несовершенном виде шумовая диагностика качества и надежности электронных компонентов не имеет альтернативы, выгодно отличается малыми временными затратами и отсутствием риска повредить исследуемый объект. 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. Значительным преимуществом таких измерений является получение информации неразрушающими методами и довольно быстро, что может позволить своевременно реагировать на сбои технологического процесса.

Исследования $1/f$ шума и его возможных применений продолжаются. В ближайшее время можно ожидать значительного расширения возможностей экспресс-диагностики электронных компонентов на основе изучения параметров НЧ шума.

Выводы

Многочисленные исследования свидетельствуют об актуальности изучения низкочастотного шума, СПМ которого описывается зависимостью $S(f) \sim 1/f^\beta$. Особенности проявления низкочастотного шума в твердых телах являются объектом исследования научного сообщества в течение длительного времени, однако его природа в разных объектах и условиях остается предметом дискуссии.

Цифровые и аналого-цифровые методы изучения спектров НЧ шума являются наиболее перспективными. При создании экспериментальных установок необходимо использовать малошумящие усилители,

обеспечивающие требуемую чувствительность в исследуемом диапазоне частот, современную элементную базу и создавать тщательную экранировку оборудования.

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

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. Вопрос о стационарности процесса генерации низкочастотного шума остается открытым. Многочисленные теоретические модели генерации НЧ шума удовлетворительно описывают процесс при выполнении конкретных приближений. Многие экспериментальные данные показывают, что равновесный шум вида $S(f) \sim 1/f^\beta$ в низкоомных объектах возникает главным образом вследствие флуктуаций подвижности носителей заряда. Между тем, пространственные некоррелированные флуктуации подвижности, независимо от их физического механизма, не могут существовать без локальных флуктуаций общей плотности носителей. Таким образом, модели флуктуаций числа носителей и флуктуаций подвижности в определенной мере «перекрываются» друг с другом,

Справедливость вакансионной модели $1/f$ шума Жигальского, разработанной для тонких металлических пленок, подтверждена многочисленными экспериментальными исследованиями по отжигу и старению, влиянию механических напряжений и деформирования, температуры и структурных факторов на уровень $1/f$ шума. Модель основана на механизме рассеяния электронов на квазиравновесных вакансиях, которое вызывает соответствующие флуктуации проводимости. Вопрос о природе формирования НЧ шума в объемных проводниковых материалах и

применимости вакансионной модели $1/f$ шума остается открытым. Результаты исследования НЧ шума в объемных проводниковых объектах и контактных устройствах в опубликованной научно-технической литературе не обнаружено.

Результаты и выводы большинства опубликованных работ свидетельствуют о важной роли дефектов структуры материалов в процессах формирования избыточного шума.

Использование неразрушающей, универсальной диагностики электронных компонентов по параметрам НЧ шума является перспективным, поскольку занимает немного времени и дает достоверные результаты по оценке их потенциальной надежности. В сочетании с другими методами диагностики и внешними воздействиями низкочастотные шумы электронных компонентов позволяют исследовать их скрытые дефекты, недоступные для изучения другими методами, на любом этапе процесса производства.

2 Разработка измерительно-аналитического комплекса и программного обеспечения

2.1 Разработка и реализация установки для измерения низкочастотного шума низкоомных элементов и программного обеспечения

Среди нерешенных общих проблем измерения спектров НЧ шума можно назвать главную – получение максимально воспроизводимых результатов. 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. Кроме того, как отмечено в разделе 2, необходимо обеспечить применение современных малошумящих компонентов элементной базы и совершенное экранирование экспериментальной установки.

На начальном этапе разработки в качестве основы выбрана установка для измерения спектров НЧ шума полупроводниковых барьерных структур [7], содержащая плату сбора данных и управляемая программой, созданной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Для разработки и реализации установки измерения низкочастотных шумов в низкоомных объектах был выбран операционный усилитель AD620 фирмы Analog Devices [74]. Усилитель AD620 предназначен для измерительного оборудования высокой точности. Он потребляет мало энергии и использует только один внешний резистор для изменения коэффициента усиления от 1 до 10 000. Этот усилитель является малошумящим и имеет низкий ток смещения входного сигнала, что позволяет использовать его в точных медицинских приборах, в приборах фиксации малых сигналов и в шумовой спектроскопии. Низкий ток смещения входного сигнала равен 1 нА, что делает этот усилитель максимально чувствительным на этапе входного сигнала. Его стоимость вполне приемлема

для использования в проектах с отдельными усилителями на каждый канал и иного сложного оборудования.

На низких частотах коэффициент усиления AD620 достаточно стабилен, его зависимость от частоты представлена на рисунке 2.1.

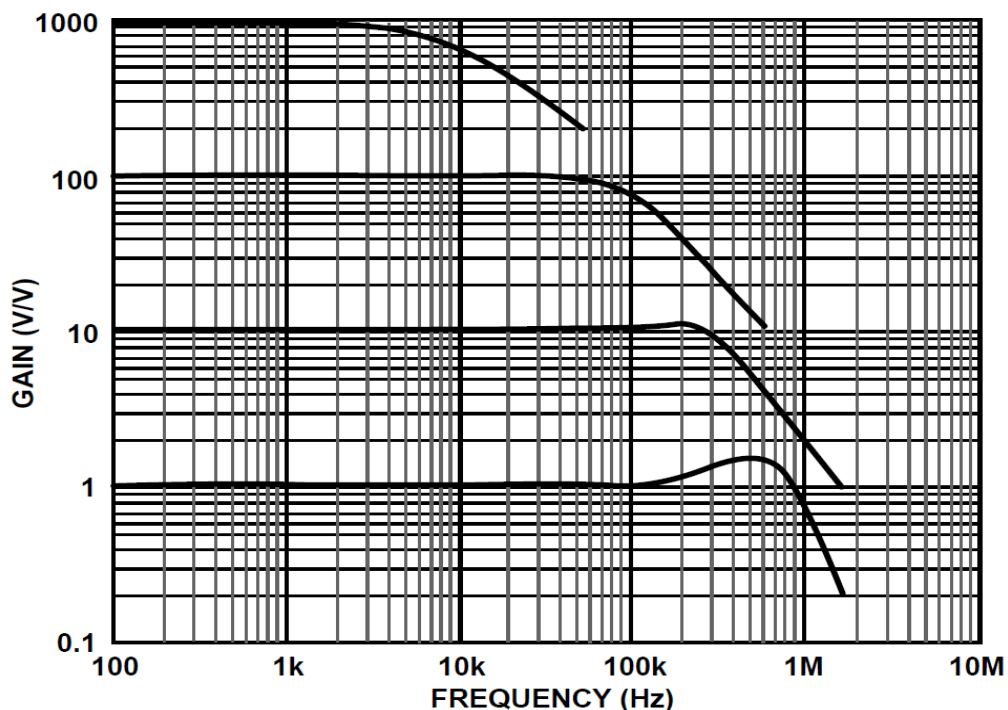


Рисунок 2.1 – Зависимость коэффициента усиления ОУ AD620 от частоты [74]

Подбор номиналов сопротивлений для обеспечения нужных коэффициентов усиления производился по таблице 2.1, представленной производителем.

Таблица 2.1–Значения номиналов резисторов, обеспечивающих необходимый коэффициент усиления [74]

Номинал сопротивления	Усиление, раз
49,9 КОм	1,99
5,49 КОм	9,998
1 КОм	50,4
499 Ом	100

В соответствии с таблицей 2.1 были подобраны и усреднены номиналы резисторов для обеспечения коэффициентов усиления в 2, 10, 50 и 100 раз.

На рисунке 2.2 приведена принципиальная схема измерительного усилителя.

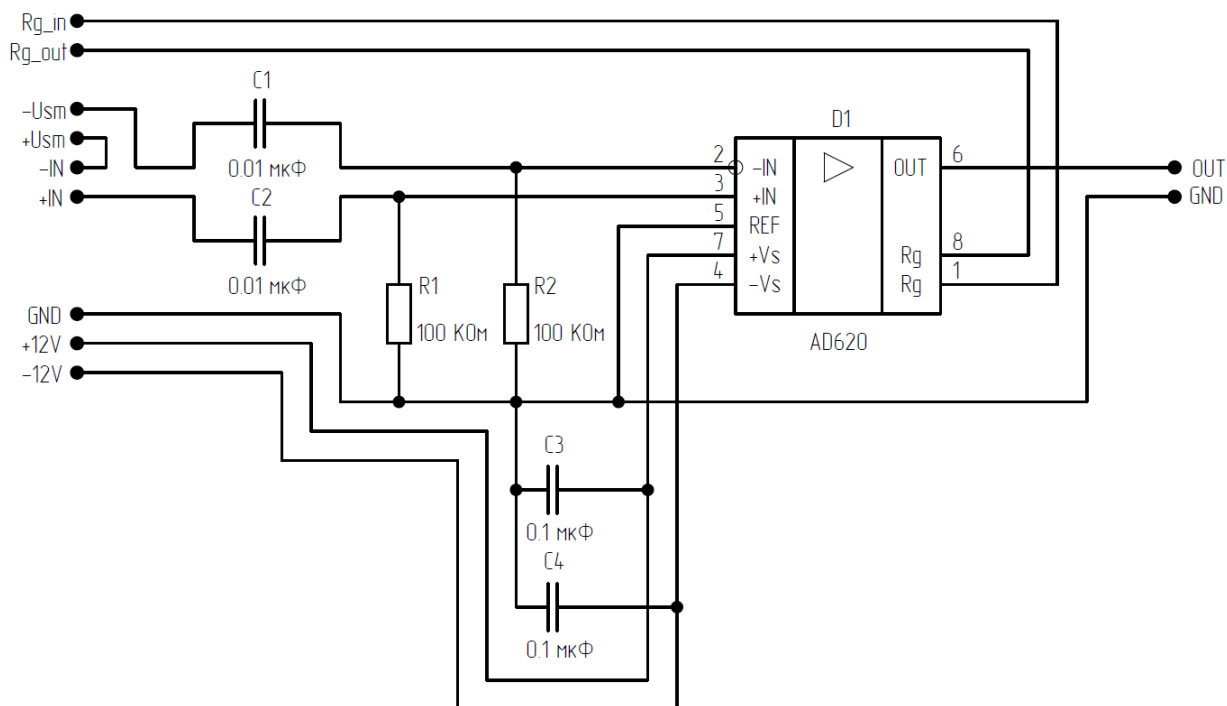


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема измерительного усилителя [75-87]

Апробация разработанной схемы (рисунок 2.2) проведена путем подачи на плату усиления низкочастотного сигнала синусоидальной формы с амплитудой 200 мВ и замера выходных сигналов усилителя при различных коэффициентах усиления, изменяемых при помощи платы коммутации и блока управления в соответствии с таблицей 2.1. Проверка проведена с помощью генератора сигналов специальной формы ГСС-120 и осциллографа Tektronix TDS 2022B. Результаты проверки усилителя представлены на осциллограммах, приведенных на рисунке 2.3.

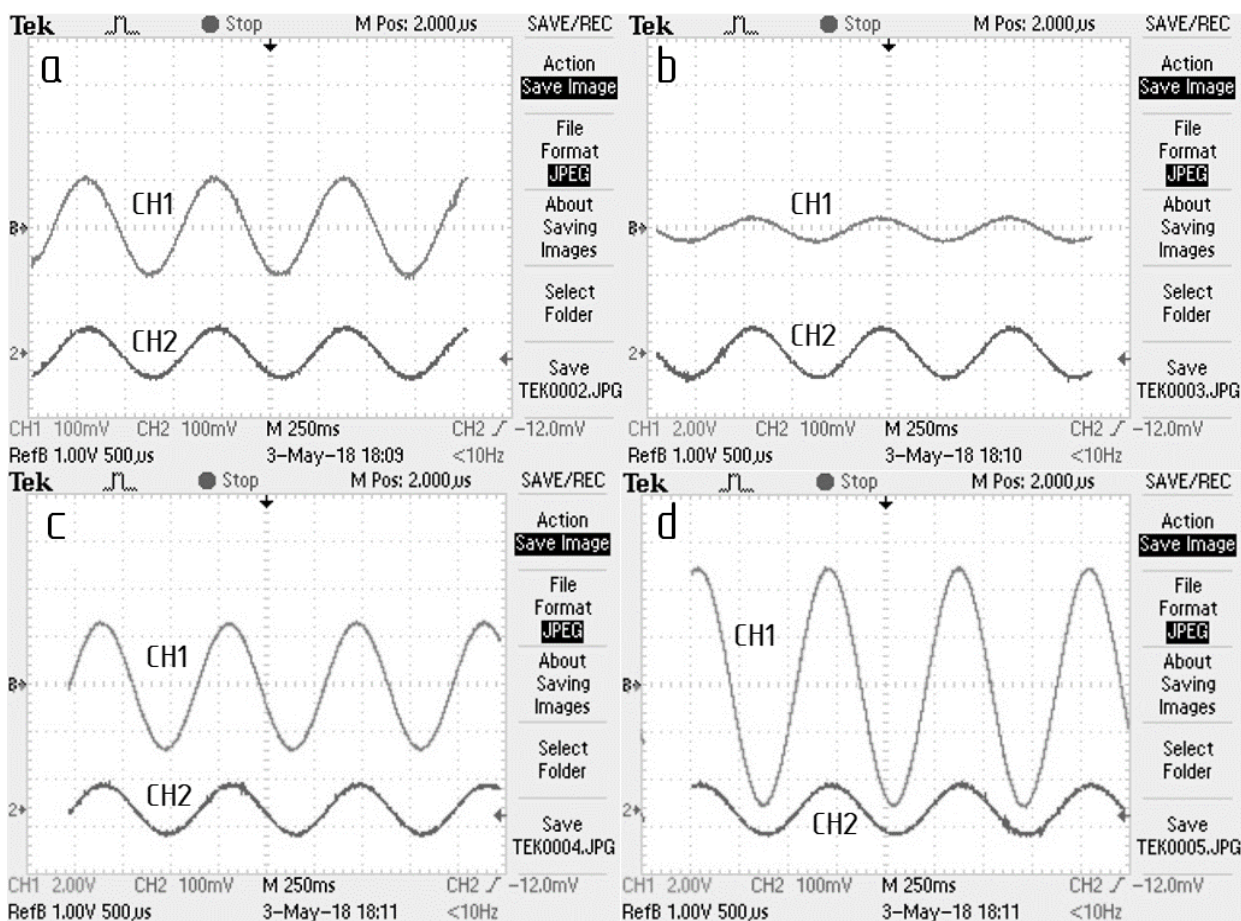


Рисунок 2.3 – Входной сигнал CH2 и выходной сигнал CH1 ОУ AD620 на частоте 1 Гц при: а- $R_g=50 \text{ КОм}$ и $K_{yc}=2$; б- $R_g=5,6 \text{ КОм}$ и $K_{yc}=10$; в- $R_g=1 \text{ КОм}$ и $K_{yc}=50$; д- $R_g=500 \text{ Ом}$ и $K_{yc}=100$

Анализ осциллограмм, приведенных на рисунке 2.3, показал, что все составляющие установки правильно функционирует на частоте 1 Гц, форма сигнала выдерживается, коэффициент усиления не меняется во время измерения, управление коэффициентом усиления выполняется корректно и своевременно. Таким образом, с помощью разработанной установки вполне возможно проводить исследования НЧ шума на частотах порядка 1 Гц. Результаты описанной разработки опубликованы в работе [78].

Для удобства использования усилителя при измерениях НЧ шума была разработана плата коммутации и блок управления для нее. Это необходимо для удаленного управления коэффициентом усиления усилителя, который помещен в экранированную ячейку вместе с исследуемым образцом. В

основе платы коммутации лежат герконовые реле EDR201A0500, которые выполняют коммутацию резисторов для подбора коэффициента усиления. Кроме того, предусмотрены выводы для подключения дополнительных устройств (соленоид с целью создания электромагнитного поля, ключи дополнительных усилителей и т.п.), что создает возможность и удобство измерения НЧ шума в низкоомных объектах. Разработанная принципиальная схема платы коммутации представлена на рисунке 2.4.

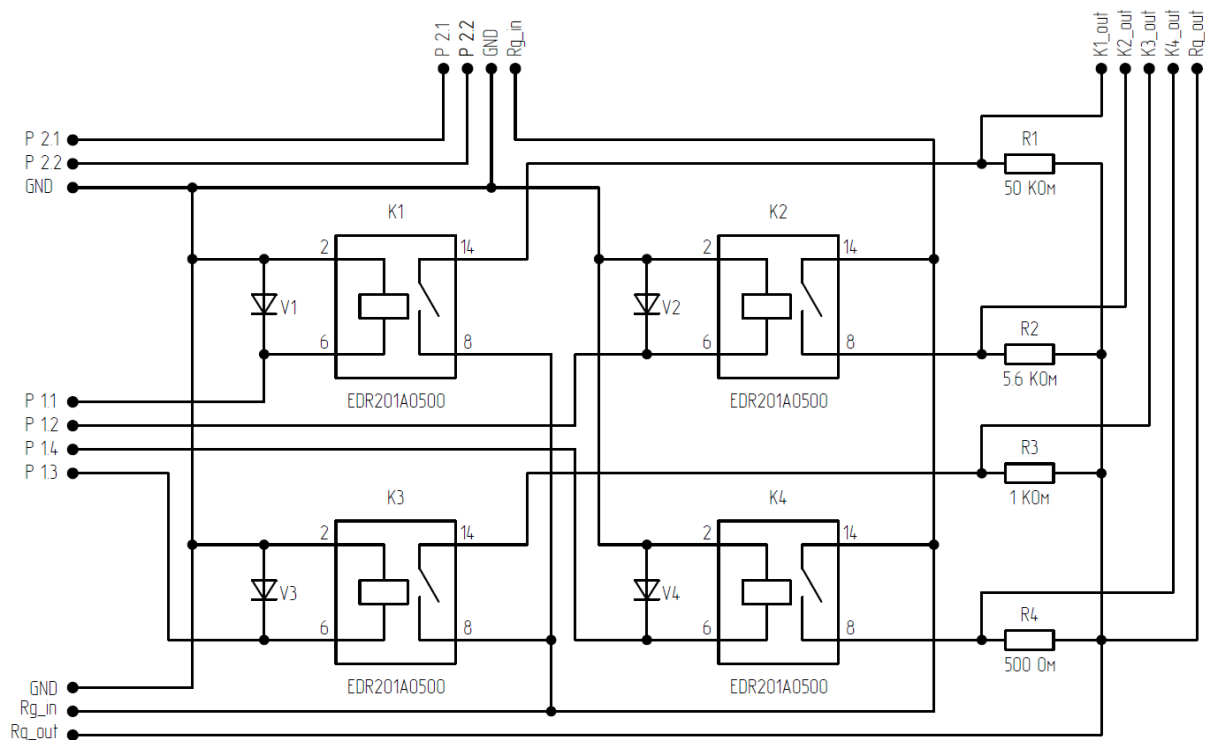


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема платы коммутации [75, 79, 80]

Анализ научно-технической литературы и рынка показал, что в качестве управляющего микроконтроллера целесообразно использовать устройство фирмы Atmel, а именно ATmega328P.

Для использования выбранного микроконтроллера была учтена возможность его программирования и обмена данными в рабочем режиме. Для реализации обмена данными был выбран протокол UART (RS-232). Это помогло упростить схему блока, благодаря возможности использования UART одновременно для программирования и обмена данными [81]. Обмен

данными по USB обеспечивает преобразователь интерфейса USB 2.0 - UART CP2102-GM [82].

В разработанном блоке управления использован знаковосинтезирующий дисплей, который обменивается данными с микроконтроллером по стандартной параллельной шине передачи данных (parallel) четырьмя разрядами [83]. Принципиальная схема блока управления представлена на рисунке 2.5.

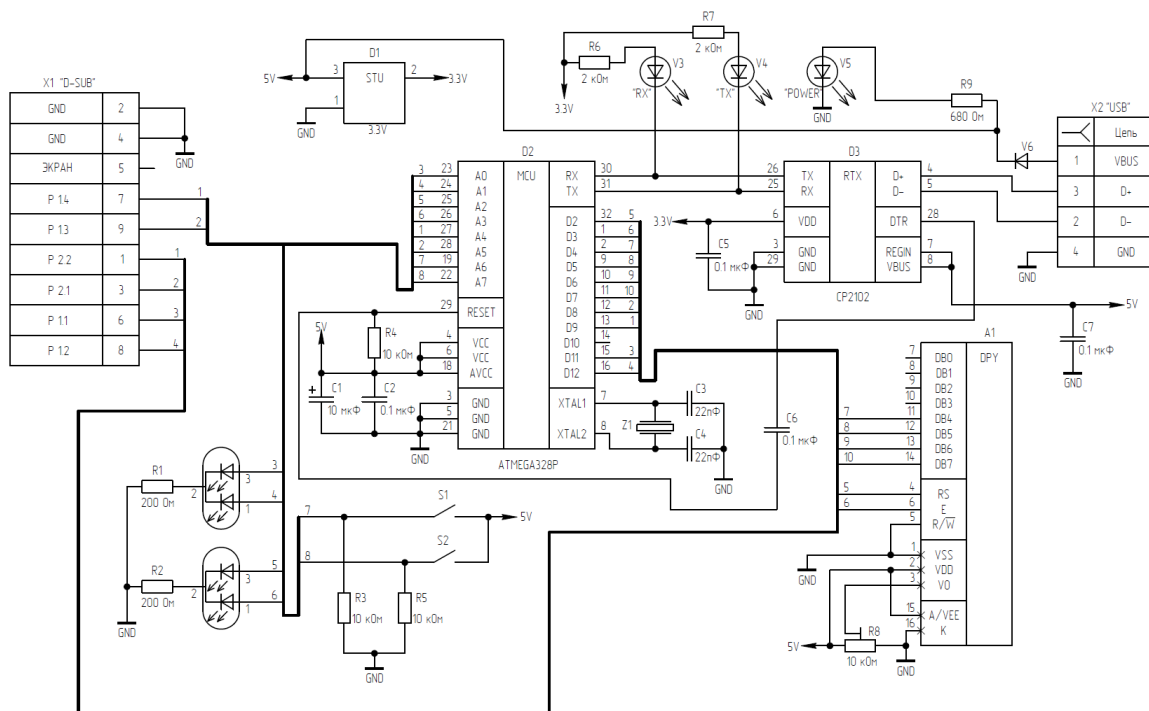


Рисунок 2.5 – Принципиальная электрическая схема блока управления

Для удобства компоновки составных частей измерительной установки были разработаны печатные платы при помощи программного обеспечения для проектирования и разводки печатных плат малой и средней сложности Sprint-Layout [84].

Разработка программного обеспечения

Разработка любой программы, будь то небольшая процедура по обработке, поступающей на консоль информации или комплексный

программный продукт, состоит из нескольких этапов, грамотная реализация которых является обязательным условием для получения необходимого результата. Четкое следование этапам разработки программного обеспечения является основополагающим критерием для создателей ПО, заинтересованных в получении программы, надежно выполняющей свои функции [85].

На основе анализа принципов работы блока управления было решено, что ПО для управления установкой должно иметь доступный графический интерфейс, общаться с установкой по протоколу RS-232, выполнять функции управления и мониторинга процессов. Для создания такого программного обеспечения в работе использована интегрированная среда разработки программного обеспечения для Microsoft Windows – C++ Builder 6. Эта среда позволяет разрабатывать консольные программы с доступным графическим интерфейсом, а также создавать программную реализацию всех необходимых задач для управления. Рисунок 2.6 иллюстрирует процесс разработки программного обеспечения в среде C++ Builder 6.

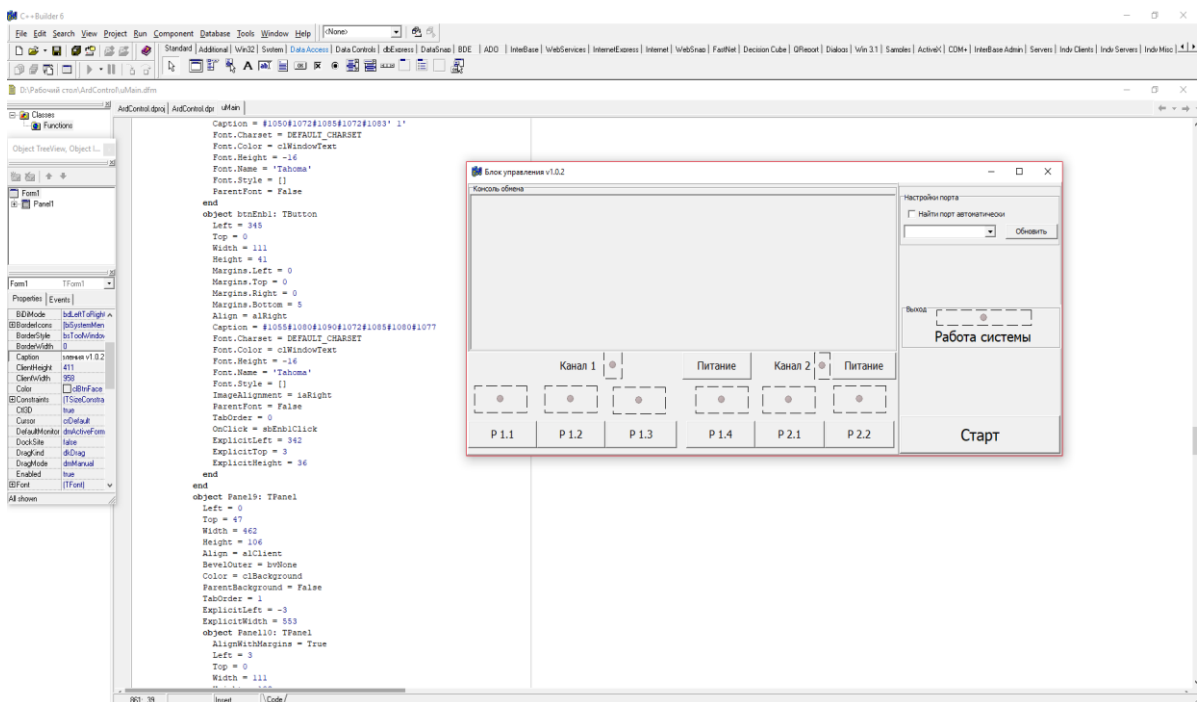


Рисунок 2.6 – Процесс разработки программного обеспечения в среде C++ Builder 6

В разработанной программе осуществлена возможность управления всеми каналами, предусмотренными в блоке управления. Кроме того, имеется индикация активных каналов, поле обработки состояния и ошибок, выбор подключаемого порта и индикация работы установки в целом.

В случае возникновения неисправности, программа определит и выдаст ошибку. В программе предусмотрена защита от случайной активации нескольких каналов одновременно, в этом случае программа отключит работу системы и включится соответствующий световой красный индикатор. Процесс и результаты работы установки одновременно отображаются в программе и на дисплее блока управления. Любое изменение хода измерения с помощью компьютера или непосредственно с помощью органов управления блока немедленно отобразится на дисплее блока управления и в главном окне программы, что делает проведение экспериментов более удобным и наглядным. Главное окно разработанной консоли управления для ОС Windows версии XP и выше представлено на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Окно разработанной консоли для управления установкой

Разработанная программа является многопоточной и создана при помощи объектно-ориентированного программирования.

2.2 Разработка и техническая реализация установки для искусственного износа (многократной коммутации) магнитоуправляемых контактов

Исследование параметров низкочастотного шума является многогранной задачей. Основная сложность измерения спектров НЧ шума заключается в учете многих нюансов, от которых зависит достоверность полученных данных.

Измерение параметров НЧ шума низкоомных объектов на начальном этапе проводилось с помощью установки, функциональная схема которой приведена на рисунке 2.8 [86, 87].

Управление установкой, функциональная схема которой представлена на рисунке 2.8, производится непосредственно с персонального компьютера, либо непосредственно при помощи блока управления. Команды, посылаемые с помощью разработанной программы управления, описанной ранее, отправляются по протоколу RS-232 на блок управления.

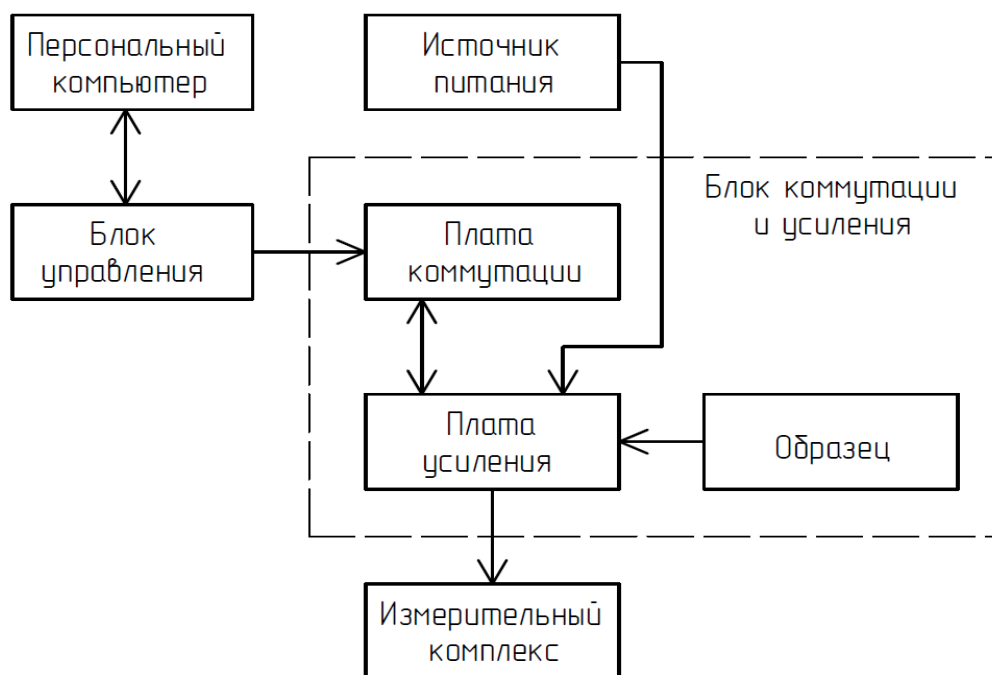


Рисунок 2.8 – Функциональная схема установки для измерения параметров НЧ шумов [88, 89]

Кроме того, все режимы отображаются в консоли ПК. Согласно принятым сигналам, ключи на плате коммутации меняют свое состояние, тем самым подбирая необходимый номинал сопротивления для платы усиления.

Двухполярный источник питания служит для обеспечения усилителя необходимым напряжением. Усилитель с выбранным коэффициентом усиления входит в рабочий режим и усиливает сигнал, приходящий от образца. Усиленный сигнал подается на измерительный комплекс [7], который в свою очередь позволяет исследовать параметры НЧ шума исследуемого образца.

Таким образом, разработана схема установки, которая позволяет проводить исследования параметров низкочастотного шума в низкоомных образцах в автоматизированном режиме.

Для упрощения работы по изучению характеристик НЧ шума в низкоомных коммутационных компонентах было принято решение отказаться от измерений при помощи платы сбора данных [7] и перейти к АЦП микроконтроллера.

Для того чтобы понять, как будет вести себя исследуемый компонент в процессе эксплуатации необходимо провести моделирование его рабочего режима или максимально приблизиться к нему. На основании анализа, проведенного в разделе 1.4, сделан вывод о возможности прогнозирования ресурса работы магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле на основании шумовой спектроскопии с помощью функциональных воздействий, то есть в нашем случае необходимы испытания с многократной коммутацией компонентов. Благодаря таким испытаниям можно прогнозировать работу коммутационного компонента в реальных условиях и наработку на отказ.

Многократная (от 2000 до 10000 раз) коммутация (замыкание – размыкание - «состаривание») геркона проводилось при помощи разработанного и смоделированного устройства многократной коммутации (рисунок 2.9), которое позволяет замыкать контакты установленного в него

геркона с частотой 20 Гц при токе $I=0,5$ А и напряжении $U=5$ В на образце, заданное количество раз.

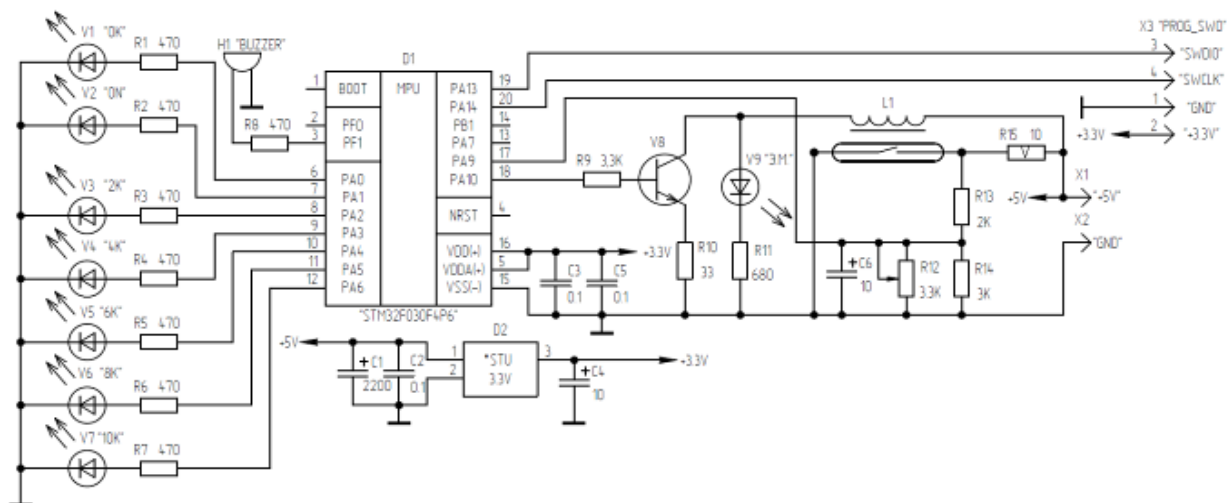


Рисунок 2.9 – Принципиальная схема устройства многократной коммутации разрывных контактов [76, 77, 88, 90]

Соленоид L1 подбирался, исходя из магнитной чувствительности исследуемых контактов для обеспечения оптимального значения напряженности магнитного поля для их замыкания [90].

Описанное выше устройство разработано и создано на основе микроконтроллера STM32F030F4P6, который позволяет реализовать любой цикл замыкания контактов. К достоинствам данного микроконтроллера относятся функциональность, невысокая стоимость и относительно низкий входной порог для программирования.

Семейство микроконтроллеров STM32 имеет обширный перечень внешних интерфейсов, что в перспективе дает возможность модернизировать устройство многократной коммутации и обеспечить управление с ПК. При обеспечении такого типа управления можно достичь полной автоматизации и автоматической подстройки параметров процесса измерений, что позволит добиваться более точных результатов исследования.

Таким образом, при помощи ряда схемотехнических решений разработано и создано устройство, с помощью которого можно реализовать искусственный износ магнитоуправляемых контактов и реле.

2.3 Разработка измерительно-аналитического комплекса и программного обеспечения

В настоящей работе применяется спектроскопия низкочастотного шума - один из наиболее чувствительных и информативных методов диагностики состояния физических объектов [6, 10, 13, 15, 16, 20, 21, 32, 35, 39, 43, 45, 91-93] и др. Для получения достоверных результатов исследования магнитоуправляемых контактов и реле необходимо разработать и технически реализовать методику исследования объемных низкоомных проводниковых объектов – коммутационных устройств. В опубликованной научно-технической литературе таких разработок не обнаружено.

Для экспресс-диагностики параметров и коммутационной надежности магнитоуправляемых контактов и реле с помощью НЧ шумовой спектроскопии разработан автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс [90, 94], 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.

Высокая скорость измерения и коммутации необходимы для проведения большого объема измерений в короткий временной интервал, что позволяет провести коммутационные испытания (искусственный износ) контактов партии из 10 приборов за несколько часов. Для осуществления цикла искусственного износа контактов без подобного устройства понадобится в несколько раз больше времени.

Автоматическая подстройка режимов износа контактов по току и напряжению требуется для увеличения точности эксперимента, определения нагрузочной способности контактов и выявления числа срабатываний на нагрузку до момента деградации.

Питание от лабораторного источника питания обеспечивает удобство и безопасность при работе с устройством.

Двойное управление дает возможность удобно проводить цикл искусственного износа и корректировку параметров процесса испытаний. Изначально настройка параметров испытаний производится с ПК, а затем корректируется непосредственно при помощи органов управления самого устройства, что позволяет визуально контролировать процесс износа.

Индикация режимов работы и текущего состояния позволяет отслеживать работу измерительно-аналитического комплекса, его настройки и наблюдать за процессом испытаний исследуемых образцов.

Выведение сервисной информации в ПК предназначено для корректировки программного обеспечения (ПО) измерительного комплекса и ПК с целью достижения более точных режимов работы.

Использование операционных усилителей с низким уровнем собственного шума позволяет получать достоверную информацию с измерительной ячейки и измерять спектры НЧ шума с собственным шумом измерительного тракта не выше $10^{-15} \text{ В}^2/\text{Гц}$.

Элементная база измерительно-аналитического комплекса

Программно-аппаратный измерительный комплекс спроектирован на базе микроконтроллера STM32F103C8T6 [95], который обеспечивает обмен данными с ПК и управляющим ПО. Микроконтроллер задает режимы коммутации (частоту срабатывания контактов, ток и напряжение коммутируемой контактом цепи), а также управляет световой и звуковой индикацией. В функции микроконтроллера входят анализ реальных параметров коммутируемой цепи (ток и напряжение) и пересчет

коммутируемой мощности. Основные параметры микроконтроллера приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Основные параметры микроконтроллера STM32F103C8T6

Серия	STM32 F1
Ядро	Arm cortex-m3
Ширина шины данных	32-бит
Тактовая частота	72 МГц
Количество входов/выходов	37
Объем памяти программ	64 кбайт (64k×8)
Тип памяти программ	Flash
Объем RAM	20k×8
Наличие АЦП/ЦАП	АЦП 10×12b
Встроенные интерфейсы	CAN, I ² C, IRDA, LIN, SPI, UART, USB
Встроенная периферия	dma, pwm, pdr, por, pvd, pwm, wdt
Напряжение питания	2–3,6 В
Рабочая температура	–40–+85 °С
Корпус	lqfp-48 (7×7)

Для обеспечения обмена данными между микроконтроллером и ПК используется преобразователь USB-UART FT232RL-REEL [96], схема которого приведена на рисунке 2.10. С помощью этого преобразователя реализуется возможность коммутации измерительно-аналитического комплекса по интерфейсу RS232 для отправки данных в ПК [90, 91].

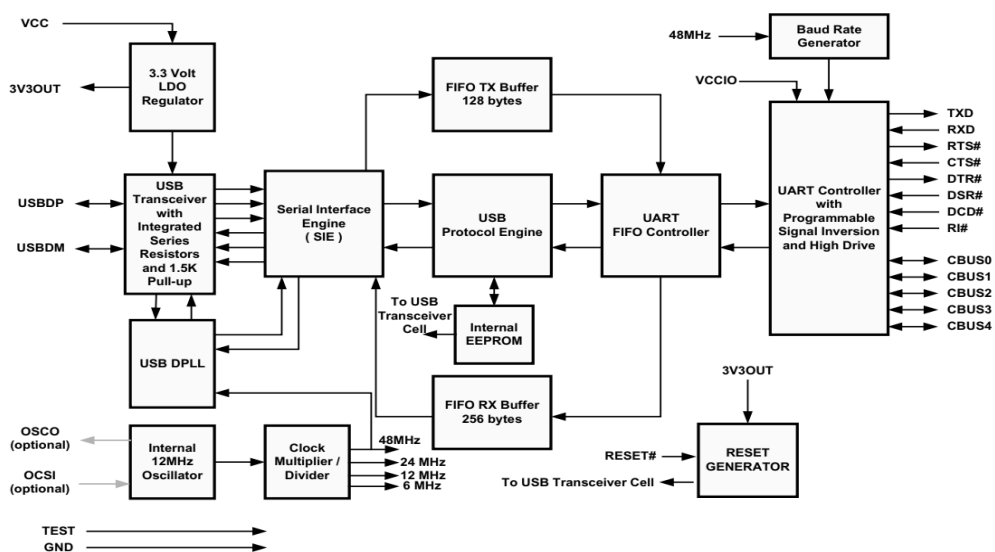


Рисунок 2.10 – Схема преобразователя USB-UART FT232RL-REEL [99]

В микроконтроллере STM32F103C8T6 имеется встроенный интерфейс USB, применяемый для вывода отладочной информации в ПК. Для обеспечения необходимых режимов работы коммутируемых цепей используются двухканальные цифровые потенциометры AD8402ARZ1[100] фирмы Analog Devices, которые управляются по интерфейсу SPI и обеспечивают возможность реализации сопротивления до 1 кОм, что удовлетворяет параметрам коммутируемых цепей [89-91]. Функциональная схема цифрового потенциометра AD8402ARZ1 приведена на рисунке 2.11.

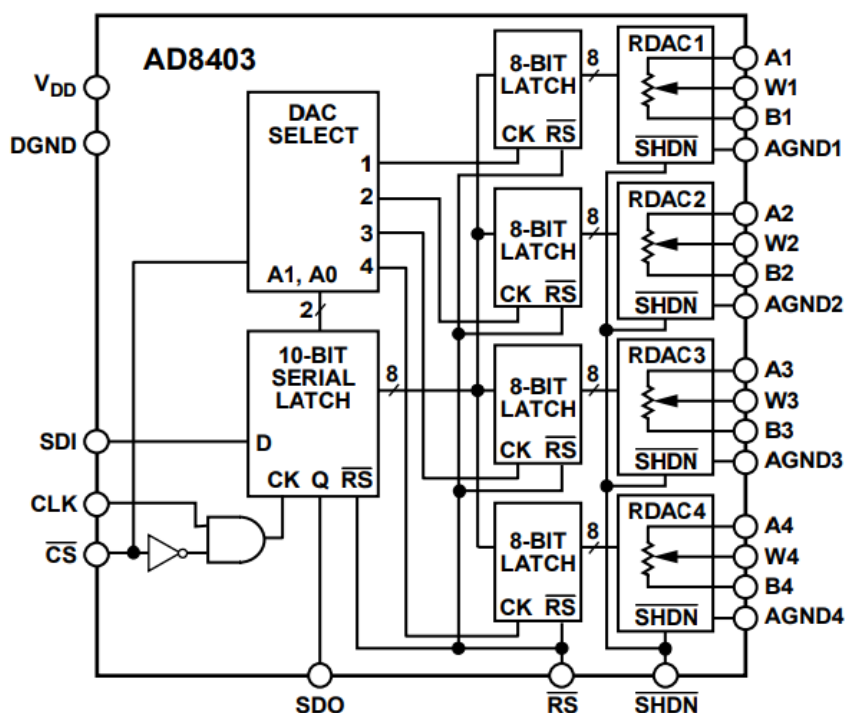


Рисунок 2.11 – Функциональная схема цифрового потенциометра AD8402ARZ1 [97]

Применение цифровых потенциометров в схемах подстройки является целесообразным [90, 91], поскольку цифровые потенциометры (например, AD8402ARZ1) имеют линейную зависимость сопротивления от загруженного в регистр числа (0–255), графики которой представлены на рисунке 2.12.

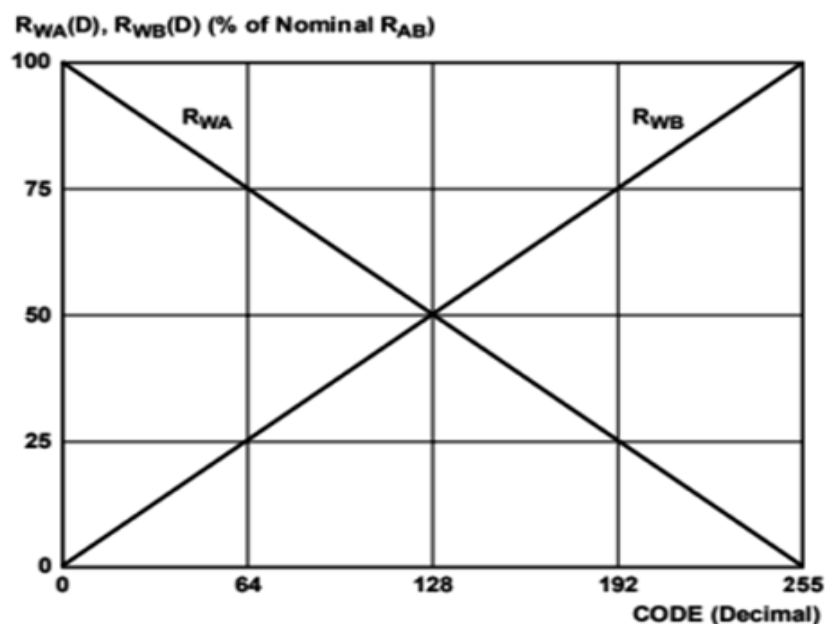


Рисунок 2.12 – Графики зависимости сопротивления цифрового потенциометра AD8402ARZ1 от загруженного в регистр числа [97]

Для контроля тока в коммутируемых цепях используются токовые датчики на эффекте Холла ACS712ELCTR-05B-T [98] фирмы Allegro Microsystems, преимуществами которых являются их размер (SOIC-8), диапазон измеряемых токов (± 5 А) и однополярное напряжение питания (+5 В). Указанные преимущества позволяют применять данные токовые датчики в схемах с микропроцессорным управлением без использования дополнительных источников питания и стабилизаторов. Широкий диапазон измеряемых токов дает возможность проектировать схемы с большим запасом по току и при необходимости увеличивать его [94]. Погрешность датчиков по току при комнатной температуре составляет не более 1,5 %, что является достаточным критерием для применения в лабораторном оборудовании. Время отклика датчика на изменение тока составляет не более 5 мкс и позволяет быстро реагировать на резкое увеличение либо уменьшение тока в измеряемой цепи. Функциональная схема токового датчика приведена на рисунке 2.13.

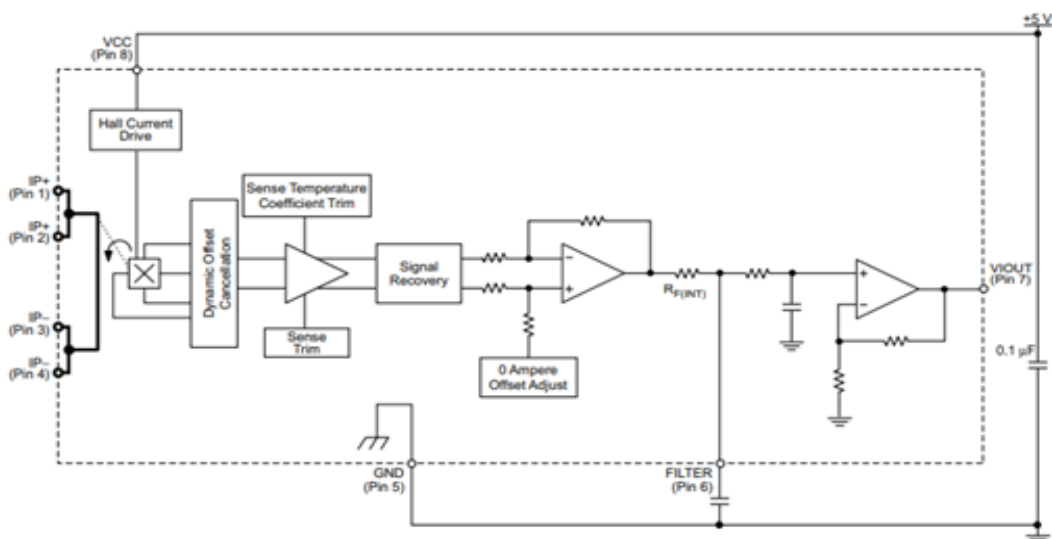


Рисунок 2.13 – Функциональная схема токового датчика ACS712ELCTR-05B-T [98]

Для обеспечения работы светодиодных индикаторов и органов управления устройством (кнопок) применяются логические буферы 74ABT245D [99] фирмы NXP Semiconductor, которые обеспечивают снижение нагрузки на микроконтроллер и защиту портов ввода/вывода [90, 91]. Функциональная диаграмма логического буфера 74ABT245D приведена на рисунке 2.14.

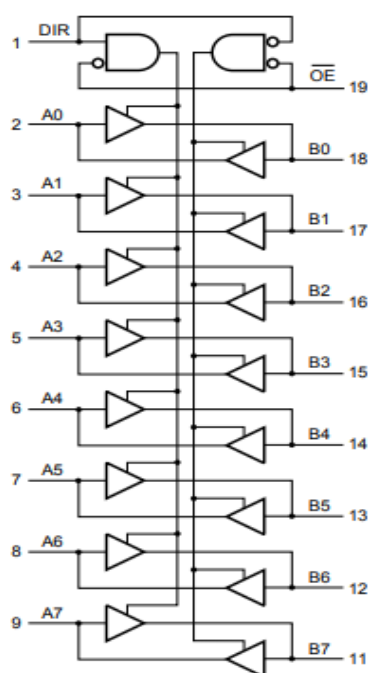


Рисунок 2.14 – Функциональная схема логического буфера 74ABT245D [99]

Питание измерительно-аналитического комплекса осуществляется от однополярного напряжения 24 В. Для обеспечения защиты и реализации номинальных напряжений составляющих частей измерительно-аналитического комплекса используются DC–DC-преобразователи фирмы АІМТЕС с выходными напряжениями 5 и 12 В [90, 91].

Измерительная ячейка представляет собой каскад из ОУ AD8512 фирмы Analog Devices и позволяет, кроме усиления сигнала от источника шума, согласовать сигнал в положительной области питающего напряжения для использования встроенного в микроконтроллер АЦП.

Разработанный комплекс дает возможность производить заданное число измерений одного образца, минимизировать количество ошибок путем усреднения полученных данных [80]. Принципиальная схема измерительной ячейки приведена на рисунке 2.15 [100, 101].

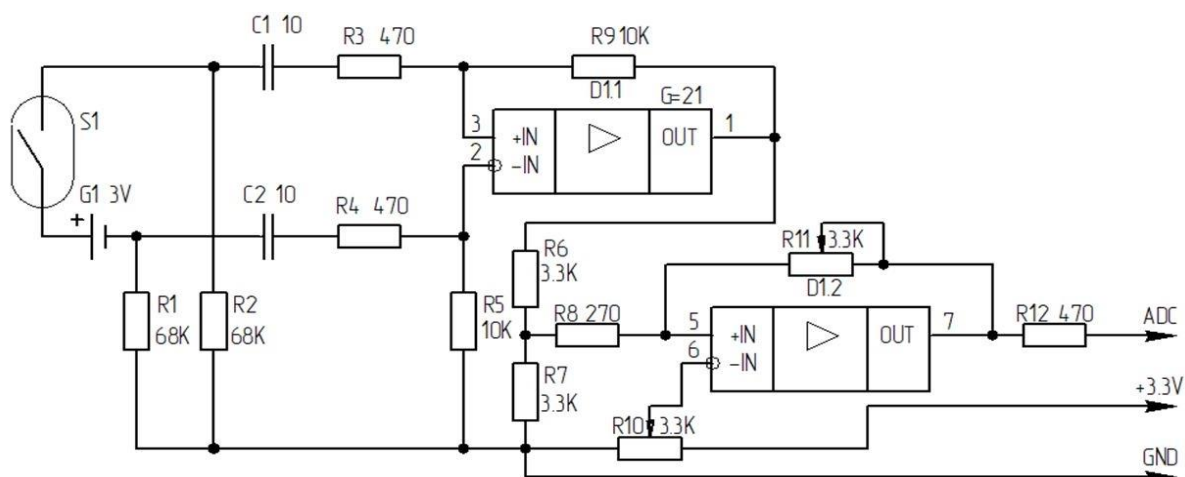


Рисунок 2.15 – Принципиальная схема измерительной ячейки [100, 101]

Для апробации работоспособности комплекса измерения образцов проводились при фиксированном коэффициенте усиления $K_{yc}=21$. Этот режим работы обеспечивал необходимую чувствительность установки, что позволило получить качественные данные распределения спектральной плотности мощности НЧ шума.

Первоначально была измерена спектральная плотность мощности собственного шума измерительного комплекса без измеряемого образца с замкнутыми входами. Результаты представлены на рисунке 2.16.

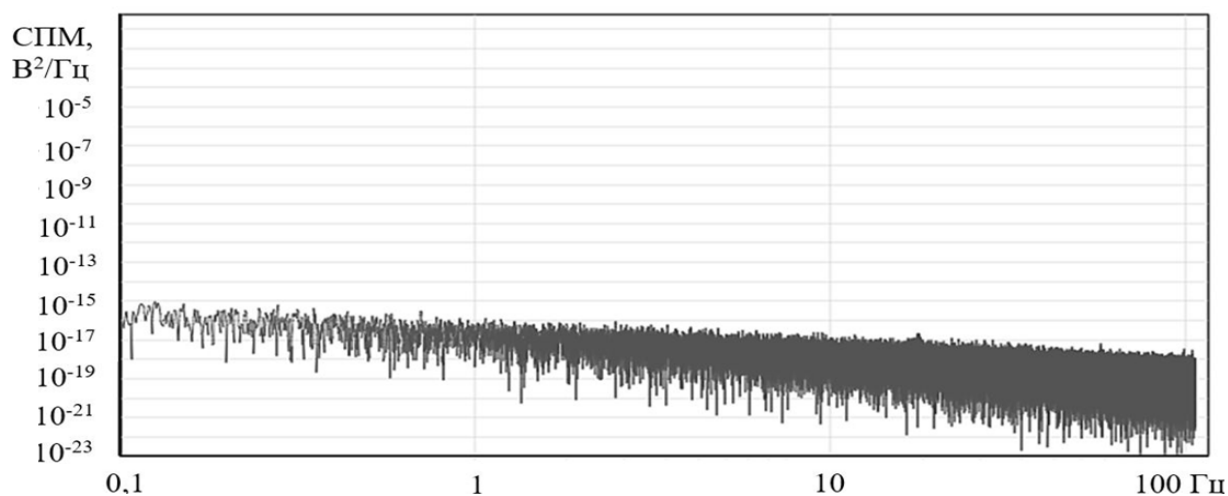


Рисунок 2.16 – Спектр собственного шума измерительно-аналитического комплекса [100]

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что СПМ собственного шума - постоянная величина, равная 10^{-15} В²/Гц.

Функциональная схема разработанного измерительно-аналитического комплекса для испытаний магнитоуправляемых контактов и реле представлена на рисунке 2.17, а принципиальная схема приведена в Приложении 1.

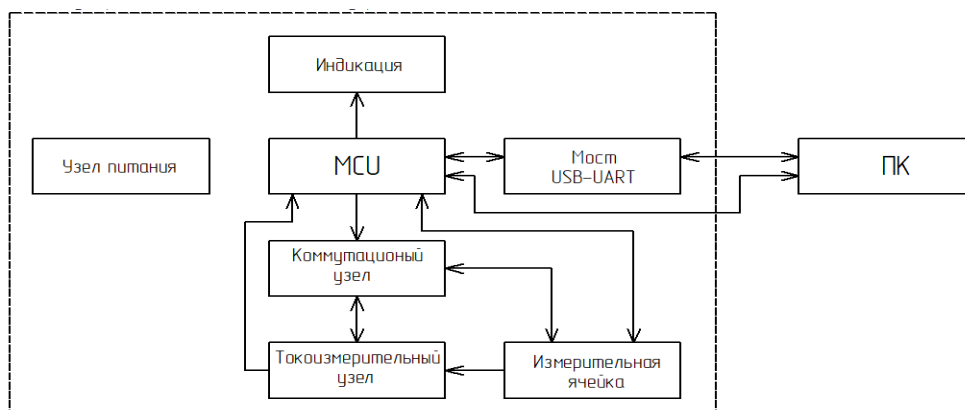


Рисунок 2.17 – Функциональная схема разработанного измерительно-аналитического комплекса для исследования магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле [88, 89]

Описание работы измерительно-аналитического комплекса

Последовательность работы автоматизированного измерительно-аналитического комплекса схематично представлена на рисунке 2.18.

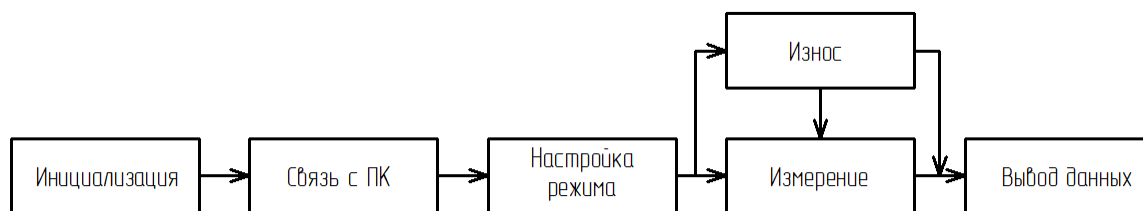


Рисунок 2.18 – Порядок работы автоматизированного измерительно-аналитического комплекса

При включении автоматизированного измерительно-аналитического комплекса происходит инициализация микроконтроллера STM32F103C8T6 и при готовности измерительно-аналитического комплекса к работе включается световой индикатор «ГОТОВНОСТЬ». Затем происходит установка геркона или реле в зажимы и осуществляется настройка режимов работы измерительно-аналитического комплекса при помощи управляющих кнопок. При подключении к ПК программно-аппаратный измерительный комплекс переходит в режим настройки и ожидает данные от терминальной программы по интерфейсу USB. Далее, когда задан режим искусственного износа (число переключений, ток, напряжение), запускается цикл многократной коммутации (износа) геркона или реле при помощи отправки команды с ПК или кнопки на измерительно-аналитическом комплексе. После заданного экспериментального цикла искусственного износа образец готов к дальнейшим исследованиям: изучению спектров НЧ шума и характеристик прибора.

Кроме того, в комплексе предусмотрена возможность проводить измерения НЧ шума установленного геркона или реле. Для этого в программе настройки необходимо выбрать соответствующий режим и настроить разрешение (время) измерения. После завершения измерений полученные данные сохраняются в графическом и текстовом форматах.

Таким образом, разработан и реализован автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс для проведения экспериментов по многократной коммутации (искусственному износу) магнитоуправляемых контактов и реле с последующим исследованием их шумовых параметров и характеристик. Комплекс реализован на базе 32-битного высокопроизводительного микроконтроллера STM32, что позволяет организовать управление коммутируемой цепью, измерение НЧ шума, обратную связь для обеспечения защитных функций, прием данных от датчиков и обработку полученной информации, а также обмен данными с ПК. Параметры разработанного комплекса представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры разработанного измерительно-аналитического комплекса

Время измерения спектра, мин	0,5-60
Разрешающая способность, 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 измерительного 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

Разработанный программно-аппаратный измерительный комплекс позволяет автоматически при заранее заданных параметрах цепи в режиме реального времени провести исследования: выполнять многократную коммутацию магнитоуправляемых контактов или реле с последующим измерением и исследованием спектров НЧ шума.

Программное обеспечение

Для обеспечения работы комплекса было разработано специальное ПО в среде разработки STM32CubeIDE 1.3.0. [102, 103]. Разработка проведена под используемый микроконтроллер STM32F103C8T6, который позволяет с высокой скоростью 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 анализа и исследования. Алгоритм работы микроконтроллера представлен на рисунке 2.19.

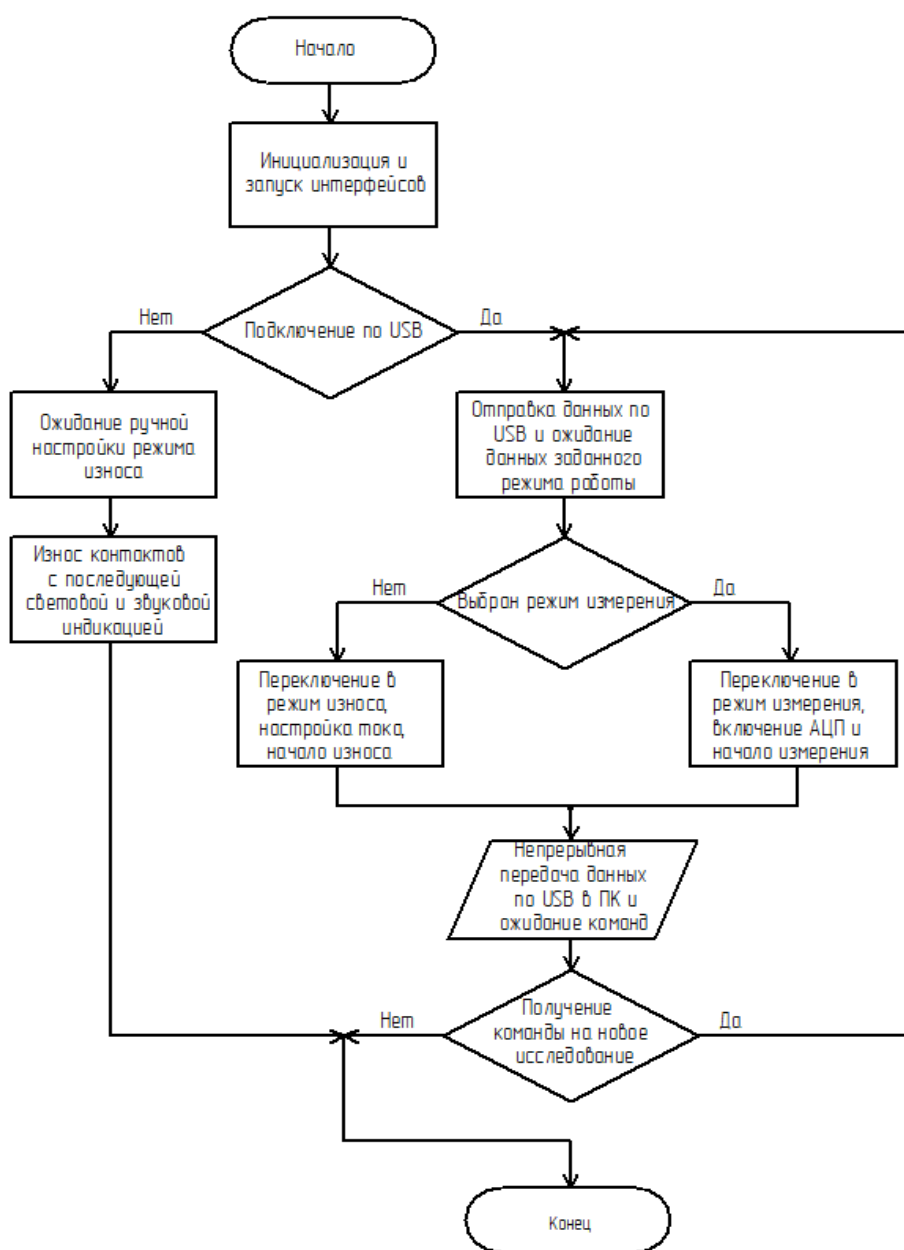


Рисунок 2.19 – Алгоритм работы микроконтроллера

Для полноценного функционирования и возможности удаленного управления процессом коммутационных испытаний и измерений спектров НЧ шума было разработано ПО для ОС Windows 7 и новее в среде разработки Rad Studio 10.4 community edition на языке программирования Delphi. Разработанное ПО позволяет поддерживать связь с комплексом по протоколу USB и в режиме реального времени отправлять на него данные о конфигурации и получать данные измерений с обработкой и выводом в реальном времени. Окно выбора подключаемого устройства и настройки разрешения измерения представлено на рисунке 2.20.

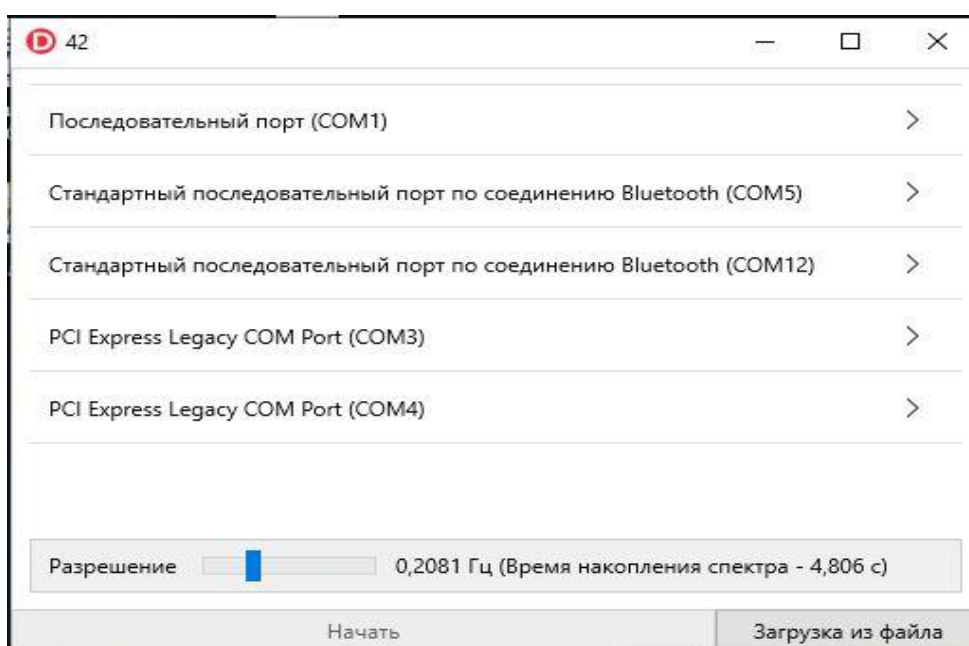


Рисунок 2.20 – Окно выбора устройства и настройки разрешения измерения ПО управления комплексом [101]

С помощью разработанного ПО обеспечивается также полная настройка режимов работы многократной коммутации контактов и измерения шумовых параметров комплексом. Окно измерения НЧ шума с окном оценки уровня и качества сигнала представлено на рисунке 2.21.

В разработанном ПО реализована возможность аппроксимации полученных спектров НЧ шума экспоненциальной функцией в логарифмическом масштабе с последующим выводом информации о частоте

перегиба, угле между аппроксимирующими линиями, значениях коэффициентов формы спектра (наклона) каждой аппроксимирующей линии. Окно аппроксимации и вывода коэффициентов представлено на рисунке 2.22.

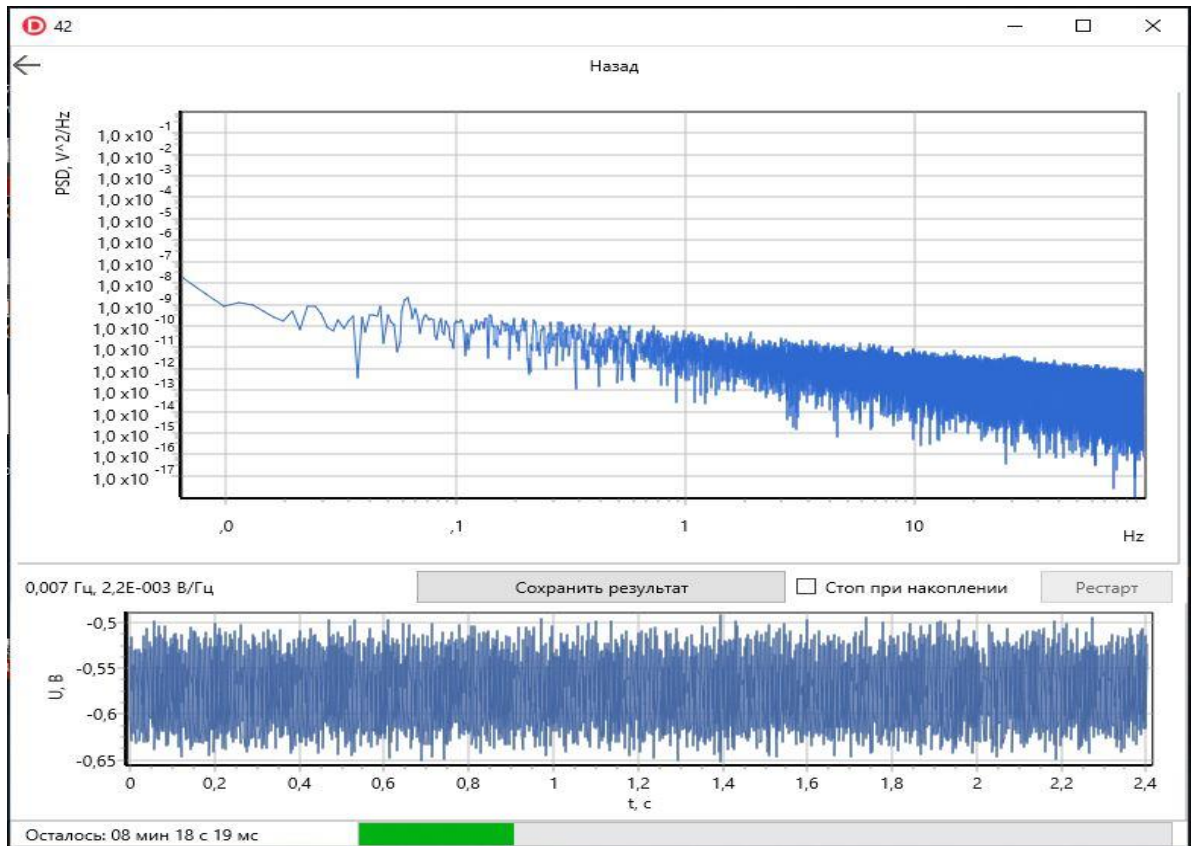


Рисунок 2.21 – Окно измерения НЧ шума с окном оценки уровня и качества сигнала [101]

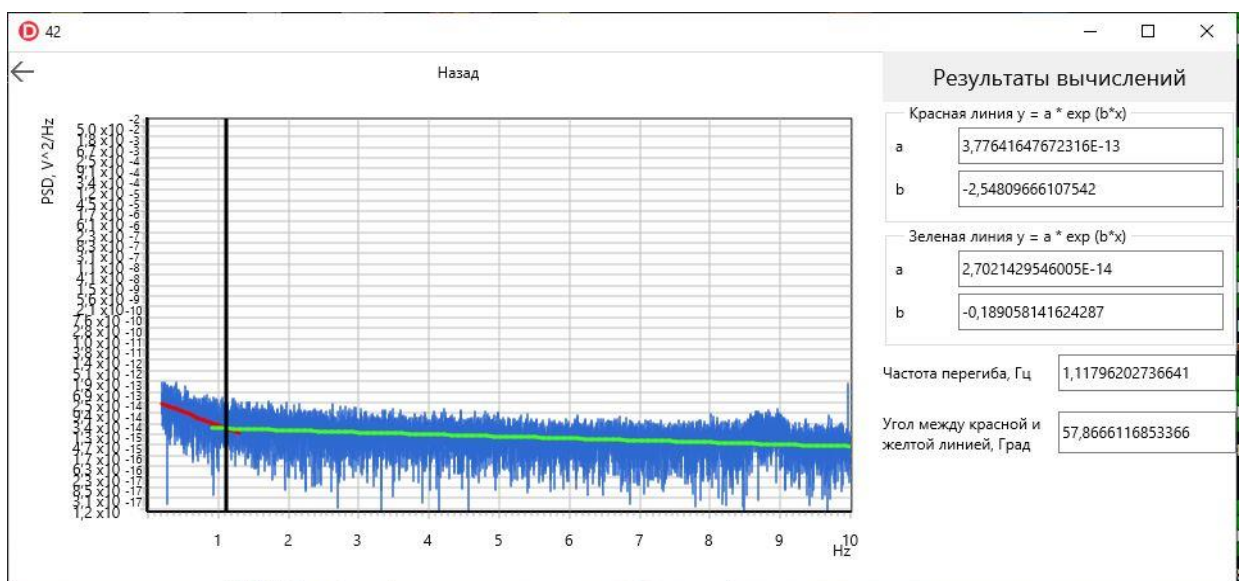


Рисунок 2.22 – Окно аппроксимации и вывода коэффициентов

Упрощённый алгоритм работы ПО управления комплексом приведен на рисунке 2.23.

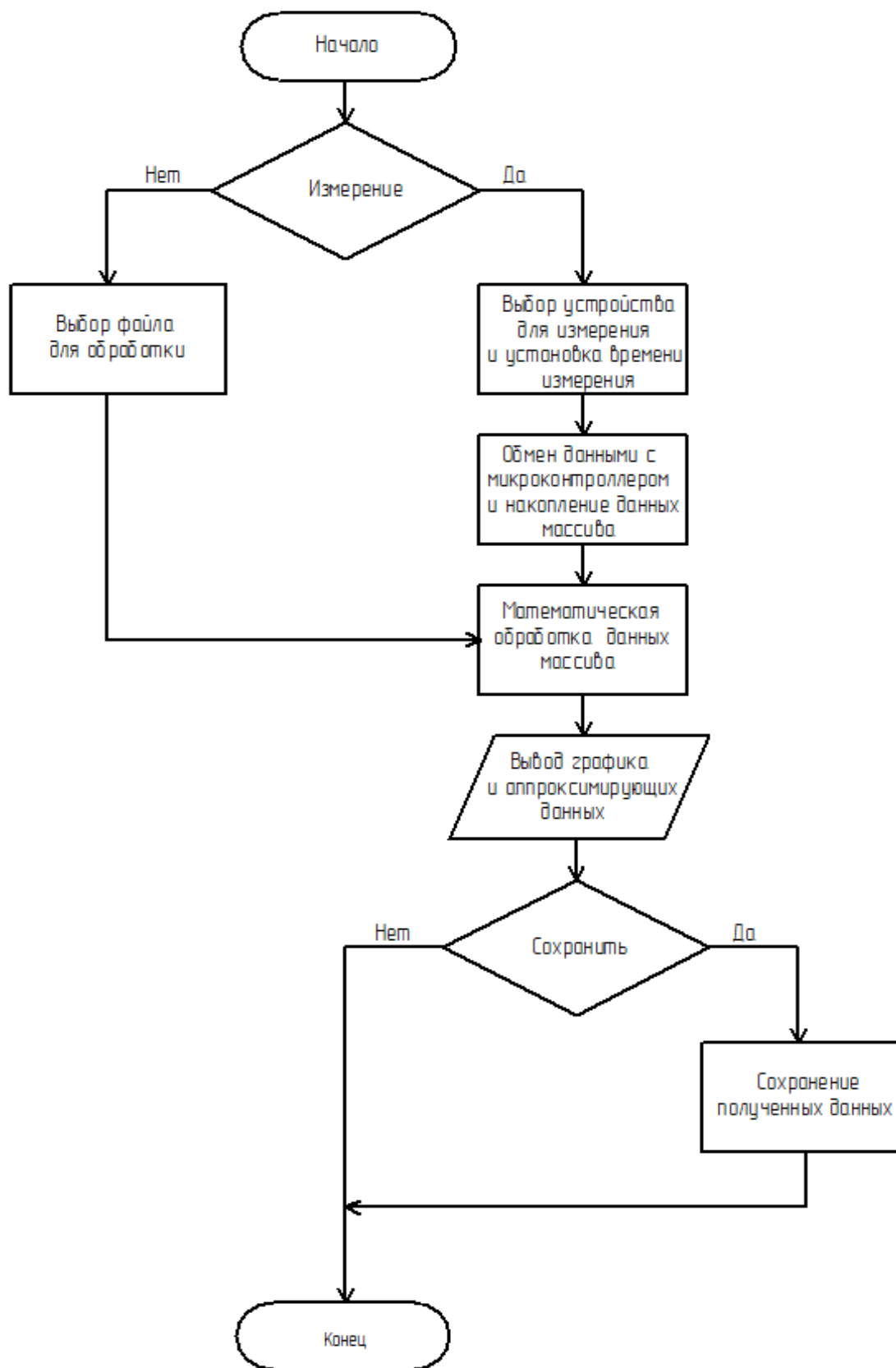


Рисунок 2.23 – Алгоритм работы ПО управления комплексом

В составе программного обеспечения измерительно-аналитического комплекса разработаны алгоритм (рисунок 2.24) и программа для реализации анализа стационарности случайного процесса генерации НЧ шума исследуемых коммутационных устройств методом вариаций (отклонения) Аллана. В результате обработки массивов экспериментальных данных построены графические зависимости отклонения Аллана для каждого экспериментально полученного спектра НЧ шума исследованных низкоомных коммутационных объектов.

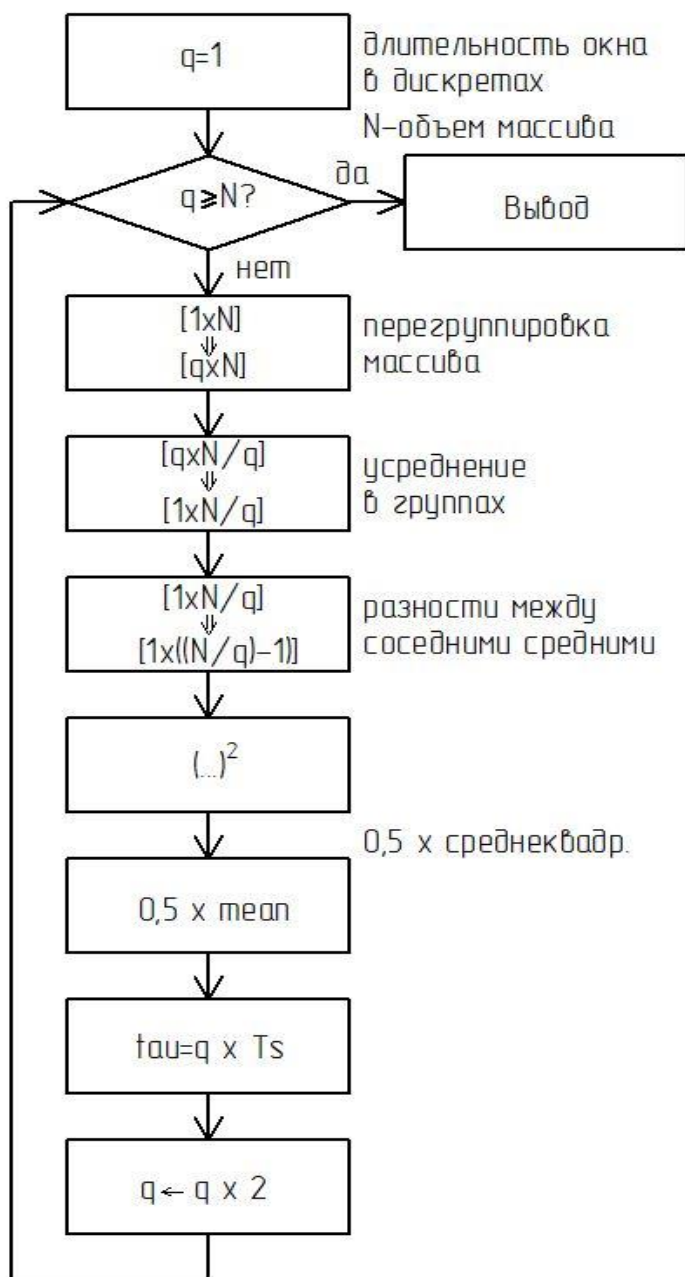


Рисунок 2.24 – Алгоритм построения отклонения Аллана

Благодаря применению разработанного алгоритма и программы, реализована возможность построения вариации Аллана для изучения природы измеряемого шума по соответствующему наклону характеристики (рисунок 2.25) и выделения необходимого диапазона для исследования конкретной области полученного спектра НЧ шума. На приведенной зависимости (рисунок 2.25), выделены также типовые составляющие процесса генерации НЧ шума в коммутационных устройствах: шумы квантования, белый и фликкер-шум, а также винеровский процесс и линейный дрейф.

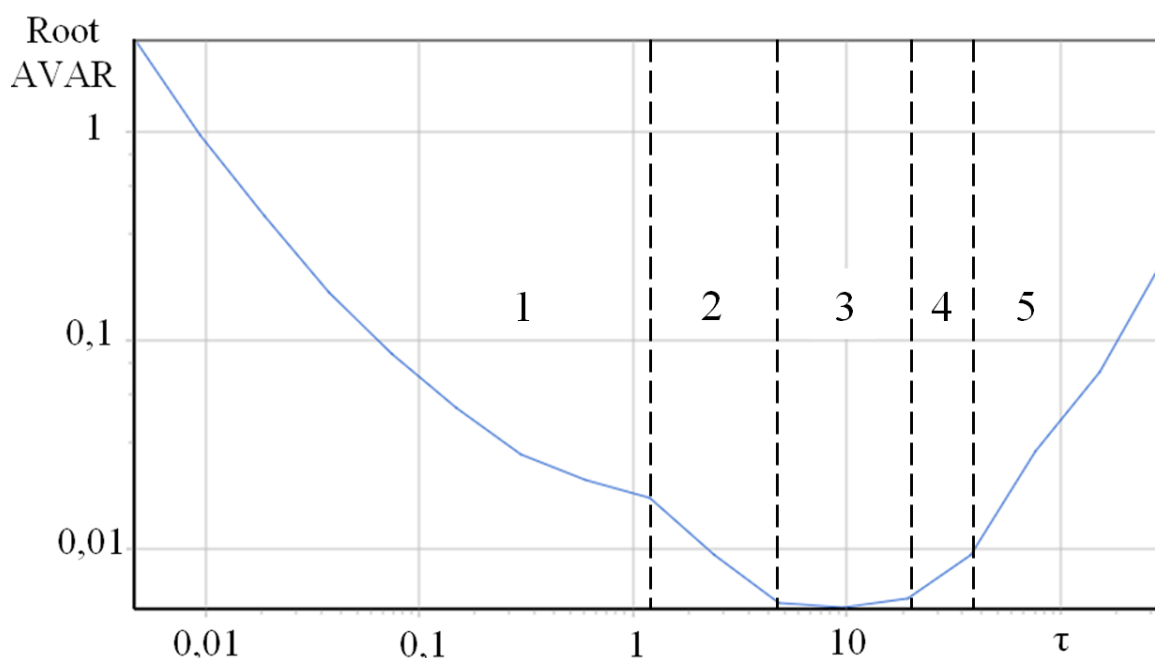


Рисунок 2.25 – График отклонения Аллана (Root AVAR) для спектра НЧ шума с высоким разрешением, где: 1 – шум квантования; 2 – белый шум; 3 – фликкер шум; 4 – винеровский процесс; 5 – линейный дрейф

Используя метод вариации Аллана в совокупности с преобразованием Фурье, можно получить дополнительную информацию об исследуемом объекте.

Для проверки работоспособности комплекса в совокупности с ПО проведен эксперимент, где вместо исследуемого образца был подключен

генератор синусоидального сигнала. Благодаря такому эксперименту, можно убедиться в исправности усилителя, правильном выборе рабочего режима, правильной работе АЦП и микроконтроллера, корректной работе протокола передачи данных, корректной работе ПО микроконтроллера и ПО на ПК, правильности расчётов и отображения данных. Окна с демонстрацией корректно получаемого отклика с синусоидальным сигналом, поданным на вход комплекса, представлены на рисунке 2.26.

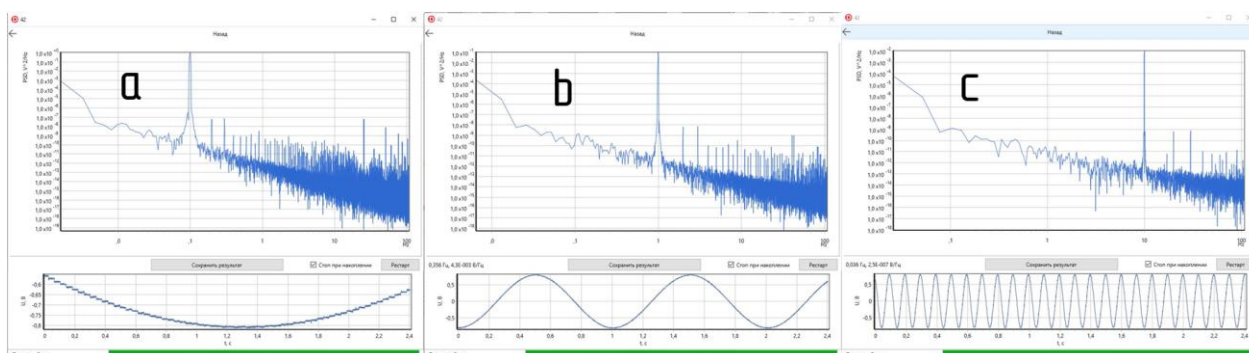


Рисунок 2.26 – Окна проверки работоспособности комплекса и ПО с разной частотой генератора: а) 0,1; б) 1; в) 10 Гц [101]

В нижней части каждого окна, представленного на рисунке 2.26, демонстрируется входной сигнал комплекса в реальном времени. В данном случае отчетливо виден синусоидальный сигнал, приведенный к нулю на частотах 0,1-10 Гц. Это означает полностью корректную работу комплекса и ПО в целом, что доказывают спектры, полученные на конкретных частотах.

Представленный автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс призван обеспечить высокую надежность, необходимые технические характеристики и успешное использование для изучения влияния многократных коммутационных испытаний на параметры магнитоуправляемых контактов или электромагнитных реле с целью прогнозирования их надежности [77, 87, 104].

Выводы

Разработан и реализован автоматизированный измерительно-аналитический комплекс, при помощи которого проведены эксперименты по многократной коммутации (искусственному износу) низкоомных проводниковых объектов и последующему исследованию спектров низкочастотного шума с целью прогнозирования надежности приборов.

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

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 - выполнить многократную коммутацию магнитоуправляемых контактов для последующих исследований спектров НЧ шума, состава и морфологии поверхности контактов. Разработана методика проведения экспериментальных исследований с помощью созданного автоматизированного измерительно-аналитического комплекса.

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. Выделены типовые составляющие процесса генерации НЧ шума в коммутационных устройствах: шумы квантования, белый и фликкер-шум, а также винеровский процесс и линейный дрейф.

3 Объекты и методика исследования

3.1 Описание образцов

Для многих коммутационных систем магнитоуправляемые контакты - герконовые реле (геркон - акроним от словосочетания «герметизированный контакт»; в англоязычной технической документации принято название «reed switch») являются оптимальным решением, особенно в том случае, когда требуются небольшой размер, высокие радиочастотные характеристики, надежная электрическая изоляция в выключенном состоянии, низкое сопротивление во включенном состоянии и способность выдерживать электростатические разряды.

Принцип действия геркона заключается в следующем. Для срабатывания электромеханического коммутационного устройства, изменяющего состояние подключенной электрической цепи (замыкание, размыкание или переключение контактов), необходимо воздействовать на элемент магнитным полем, напряженность которого будет достаточной для коммутации. В качестве источника такого поля может выступать постоянный магнит или электромагнитная катушка (соленоид). Под воздействием силовых линий происходит намагничивание контактов и после преодоления порога упругости они коммутируют цепь.

Первый магнитоуправляемый контакт был изобретен в 1922 году в Петербурге профессором В. Коваленковым. Конструкция такого контакта представлена на рисунке 3.1.

Устроен такой контакт следующим образом. К сердечнику 3 из магнитомягкого материала через изолирующие прокладки 5 прикреплены контакты 1 и 2, выполненные также из магнитомягкого материала. При пропускании тока через катушку 4 в сердечнике 3 возникает магнитное поле и намагничивает контакты 1 и 2, которые замыкаются [105]. По сути, это и был первый геркон, только без герметизирующей оболочки.

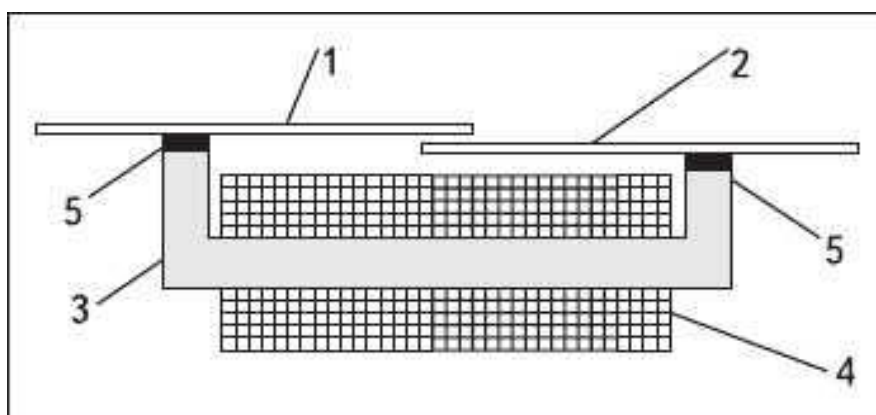


Рисунок 3.1 – Магнитоуправляемый контакт профессора В. Коваленкова

Внешний вид современного геркона представлен на рисунке 3.2. По конструктивным особенностям выделяют «сухие» и ртутные герконы. В первом случае колба заполнена осушенным воздухом или специальным газом.

Дребезг — явление, возникающее в электрических и электронных переключателях, при котором они вместо некоторого стабильного сигнала выдают на выходе случайные частотные колебания (шум). Дребезг геркона является причиной лишних импульсов, что приводит в итоге к заведомо ложным показаниям в аппаратуре с его использованием. Вибрация контактов или «дребезг» происходит при срабатывании, после подачи коммутируемого тока. Контакты сначала замыкаются, а потом сразу же размыкаются, тем самым изменяя контактное сопротивление. Для уменьшения электрического сопротивления и дребезга ртутных, по-другому «смоченных», герконов поверхности контактов покрывают тонкой пленкой ртути.



Рисунок 3.2– Внешний вид геркона [106]

Основные параметры герметизированных контактов (коммутаторов) разделяются на механические и электрические. К первым относятся:

- N_{\max} – число, указывающее максимально допустимое количество срабатываний без изменения основных характеристик;
- $F_{\text{ср}}$ – магнитодвижущая сила - величина, соответствующая интенсивности поля, необходимого для реакции устройства;
- $F_{\text{от}}$ – величина, соответствующая силе размыкания;
- $t_{\text{ср}}$ – время, необходимое на срабатывание контактной группы.
- $t_{\text{отг}}$ – интервал времени, необходимый на отпускание.

Последние два параметра наиболее значимые, так как описывают скорость коммутации.

Электрические параметры:

- $R_{\text{п}}$ – сопротивление между контактами в замкнутом состоянии;
- $R_{\text{из}}$ – сопротивление разомкнутых контактов;
- $U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя. Данный параметр зависит как от предыдущего параметра, так и от наполнения колбы и расстояния между группой контактов;
- P_{max} – коммутирующая мощность;
- I_{max} – коммутируемый ток;
- U_{max} – коммутируемое напряжение;
- $C_{\text{к}}$ – емкость, образуемая разомкнутыми контактами [110].

Главные особенности герконов – это высокое сопротивление изоляции (достигает десятков МОм), а также высокое пробивное напряжение, порядка десятка киловольт. Срок службы доходит до миллиардов срабатываний. Но на фоне достоинств, данное устройство имеет и недостатки. Основные проблемы магнитоуправляемых контактов – низкий показатель коммутирующей мощности, хрупкость и вибрация.

В настоящей работе исследованы 5 партий герконов по 5 - 15 образцов, часть которых (партии 1, 2, 4) была предоставлена для исследования

предприятием АО «РЗМКП». В таблицах 3.1 - 3.5 приведены основные параметры опытных образцов. При дальнейшем упоминании образцов первая цифра обозначения указывает номер партии, вторая – номер образца. Указанные в таблицах 3.1- 3.5 параметры герконов расшифрованы выше. Для сравнения результатов испытаний контакторов в работе была исследована партия электромагнитных реле AXICOM IM06, состоящая из 5 образцов, параметры которых приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.1 – Параметры герконов МКА-14103 партии 1

№	R, Ом	F _{ср} , А	F _{от} , А	Материал контактов
1	0,08	13	7	пермаллой с покрытием Au-Ru
2	0,08	12	7	пермаллой с покрытием Au-Ru
3	0,16	15	6	пермаллой
4	0,12	13	5	пермаллой
5	0,11	14	7	пермаллой

Таблица 3.2 – Параметры герконов МКА-14103 партии 2

№	R, Ом	F _{ср} , А	F _{от} , А	U _{пр} , В	Материал контактов
1	0,08	12	7	275	пермаллой с покрытием Au-Ru
2	0,08	13	7	265	пермаллой с покрытием Au-Ru
3	0,08	14	8	285	пермаллой с покрытием Au-Ru
4	0,08	12	7	275	пермаллой с покрытием Au-Ru
5	0,08	12	7	260	пермаллой с покрытием Au-Ru
6	0,11	14	7	300	пермаллой
7	0,11	13	7	290	пермаллой
8	0,16	15	6	305	пермаллой
9	0,12	13	5	285	пермаллой
10	0,15	14	6	300	пермаллой
11	0,075	15	5	255	пермаллой

Таблица 3.3 – Параметры герконов МКА-14103 партии 3

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R, Ом	0,14	0,23	0,12	0,04	0,08	0,19	0,24	0,18	0,12	0,29

Таблица 3.4 – Параметры герконов МКА- 10110 партии 4 (брак по высокому сопротивлению)

№	R _п , Ом	F _{ср}	F _{от}
1	0,277	8,3	4,5
2	0,339	13,4	6,5
3	0,624	10,6	5,7
4	1,463	8,4	4,4
5	0,322	9,8	5,6
6	1,118	11,2	6,3
7	1,865	11,8	5,9
8	0,232	7,8	4,4
9	0,512	9,1	5,3
10	0,881	13,1	6,7

Таблица 3.5– Параметры герконов МКА-14103 партии 5

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R, Ом	0,08	0,07	0,11	0,12	0,08	0,08	0,07	0,06	0,13	0,11	0,14	0,1	0,05	0,12	0,08

Таблица 3.6– Параметры электромагнитных реле AXICOM IM06

№	R, Ом	I _{max} , А	U _{max} , В (DC)	U _{обм} , В	Механическая выносливость, срабатываний
1	0,02	2	220	12	10 ⁸
2	0,02				
3	0,03				
4	0,04				
5	0,02				

U_{обм}, В - рабочее напряжение обмотки

3.2 Методические особенности экспериментальных исследований

В работе проведено 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 и электромагнитных реле методами шумовой спектроскопии очень важно знать контактное сопротивление, являющееся важнейшей характеристикой их качества, для получения корректных статистических данных и отбраковки. Кроме того, поскольку природа НЧ шума связана с протеканием тока через объект [1, 13, 51], 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, β – показатель формы спектра.

Для выявления методических факторов (режимов коммутации), влияющих на результаты изучения НЧ шума, исследована 5-я партия, состоящая из 15 герконов МКА-14103, предназначенных для коммутации цепей постоянного и переменного токов (таблица 3.5).

Одной из задач настоящего раздела 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.

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 3.3. Условия эксперимента выбраны, исходя из реальных условий работы магнитоуправляемых контактов. Изменение сопротивления выходного резистора при постоянном 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.

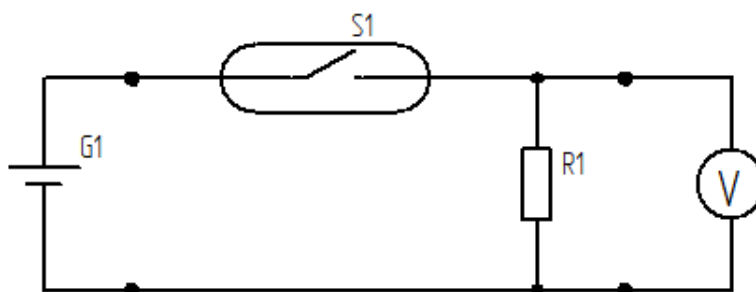


Рисунок 3.3 – Схема измерения контактного сопротивления геркона в виде четырехполюсника [104]

Выходное напряжение на каждом образце, включенном по схеме четырехполюсника, измерено 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:

$$F(z) = \left(\begin{array}{c} 1 \\ z + 0,1 \\ z^2 \\ e^z \end{array} \right), \quad (3.1)$$

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 входного напряжения каждого геркона, включенного по схеме четырехполюсника, были выявлены максимальные значения, наиболее приближенные к значению входного напряжения, и построены характеристики (рисунок 3.4). 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_1 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 [3, 17].

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.

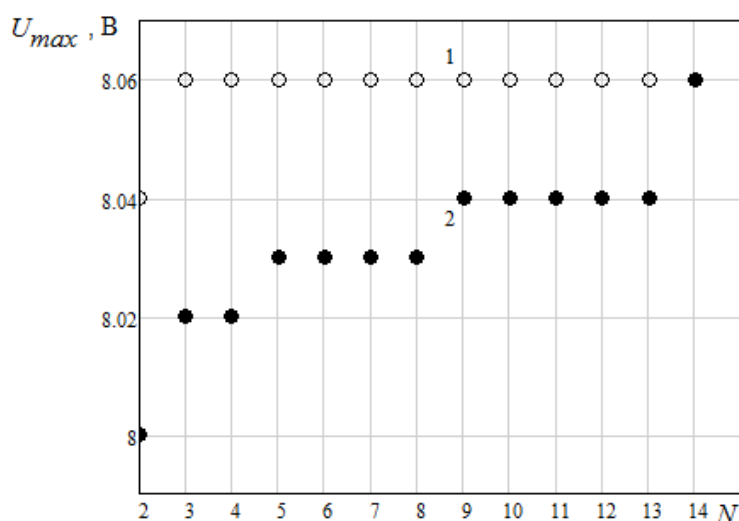


Рисунок 3.4 – Максимальные значения выходных напряжений каждого геркона, включенного по схеме четырехполюсника:
1 – при токе 0,1 А, 2 – при токе 0,2 А

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 5.15 (рисунок 3.5). Из данных рисунка 3.5 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 3.5 следует, что разности значений входного и выходных напряжений при токе 0,1 А имеют меньшее значение, чем при токе 0,2 А.

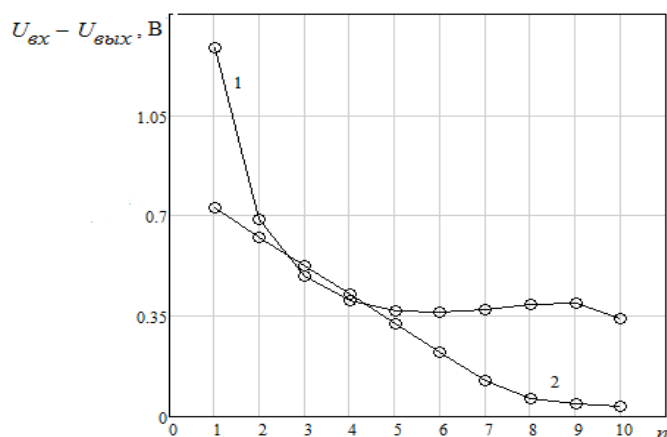


Рисунок 3.5 - Зависимость разности входного и выходных напряжений от числа измерений для геркона 5.15: 1 – при токе 0,2 А, 2 – при токе 0,1 А

При анализе значения диапазона расхождения входного и выходных напряжений каждого геркона, включенного по схеме четырехполюсника (рисунок 3.6), выявлено следующее: при токе 0,2 А разница между входным и выходным напряжениями имеет большую величину, чем при токе 0,1 А. При токе 0,1А разница находится в пределах 0,12 В, при токе 0,2 А – 0,26 В.

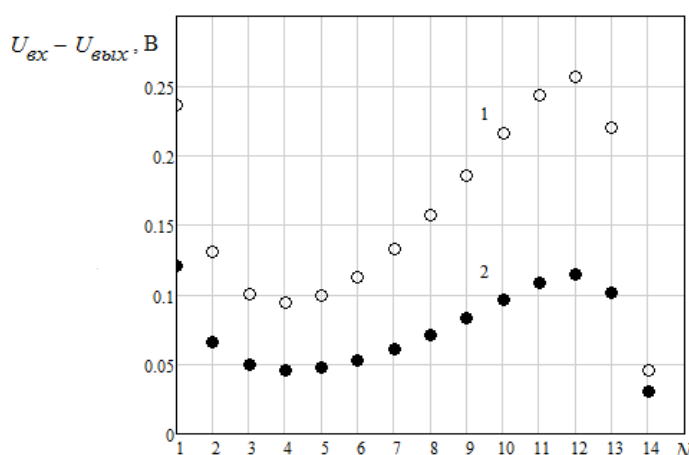


Рисунок 3.6 – Значение диапазона расхождения входного и выходных напряжений каждого из 15 герконов, включенных по схеме четырехполюсника: 1 – при токе 0,2 А, 2 – при токе 0,1 А

В итоге была построена характеристика разброса сопротивления каждого геркона в двух режимах (рисунок 3.7).

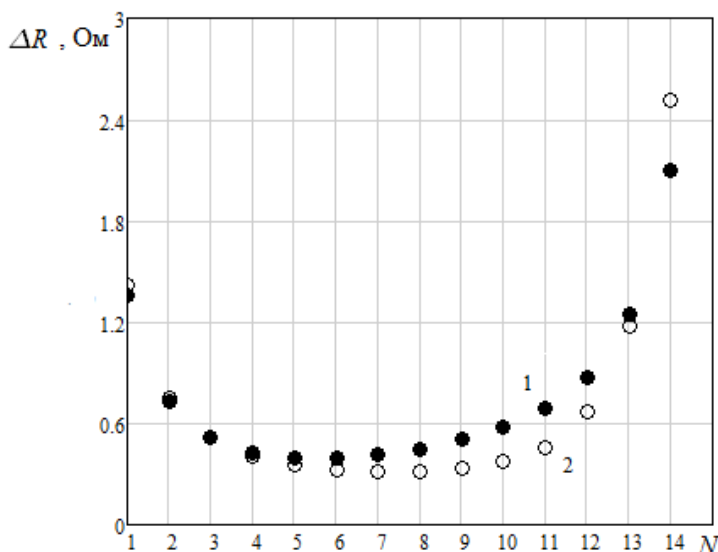


Рисунок 3.7 – Разброс значений сопротивлений каждого геркона:
1 - при токе 0,2 А, 2 – при токе 0,1 А

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 3.8 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.

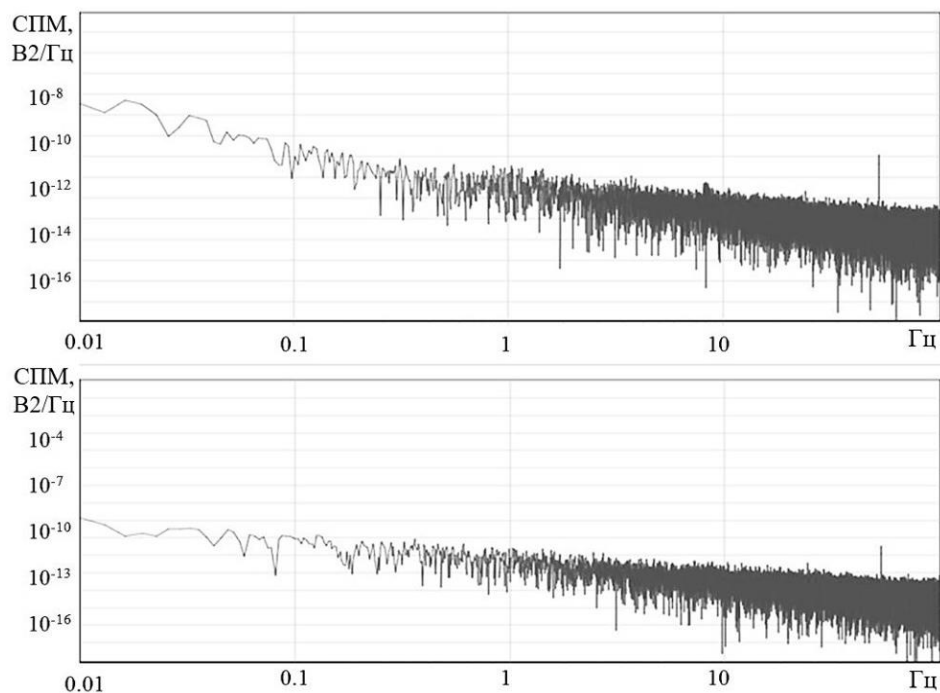


Рисунок 3.8 – Спектры НЧ шума образца 5.12, полученные с использованием бариевого феррита

Для обработки спектров НЧ шума разработана специальная программа, позволяющая аппроксимировать характерные участки зависимости до и после точки (частоты) перегиба (изменения угла наклона аппроксимирующих прямых) с вычислением параметров – соответствующих показателей формы спектра β (рисунок 3.9). Результаты расчетов представлены в таблице 3.6.

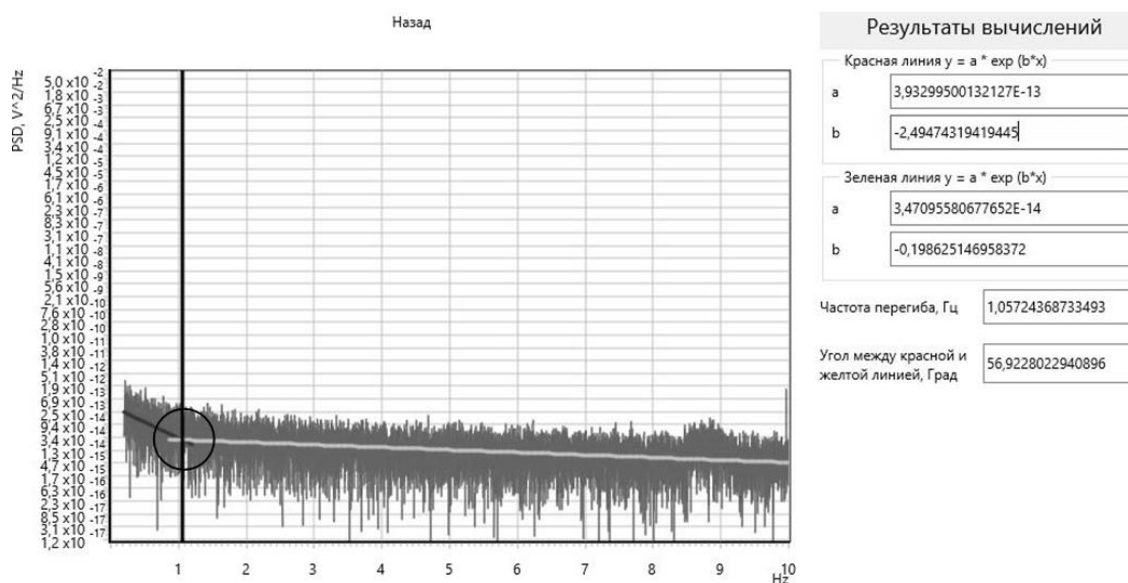


Рисунок 3.9– Пример обработки спектра и расчета параметров

Таблица 3.6 – Параметры спектров НЧ шума при повторных коммутациях магнитоуправляемого контакта (образец 5.12)

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

На рисунке 3.10 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.

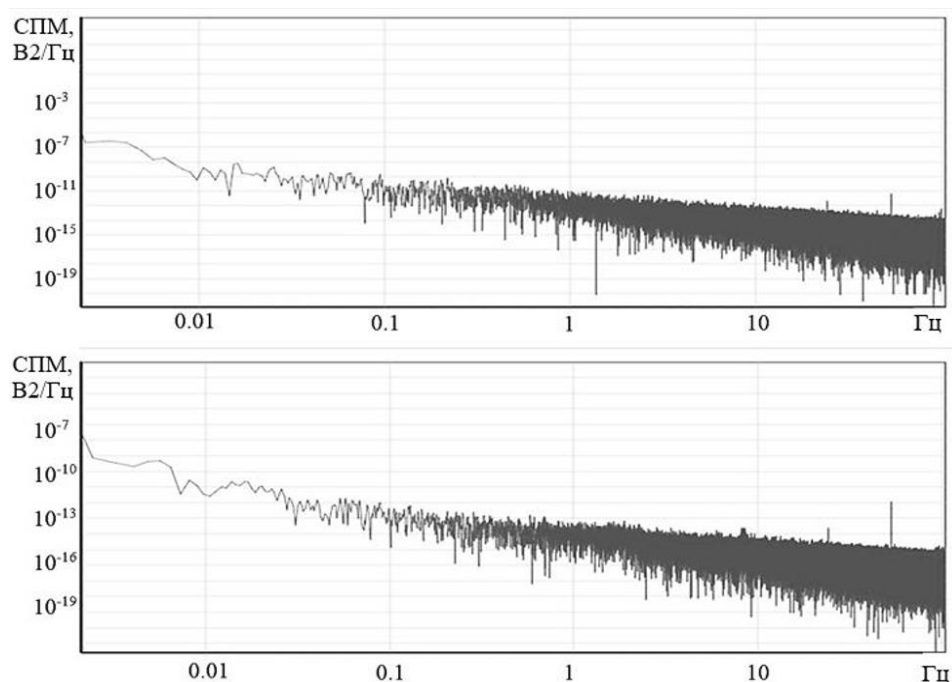


Рисунок 3.10 – Спектры НЧ шума образца 5.12 с использованием неодимового магнита

Измерения спектров НЧ шума, результаты которых представлены на рисунке 3.11, проведены дважды в равных условиях на том же образце при использовании электромагнитной катушки, которая обычно используется в нашей установке при исследовании магнитоуправляемых контактов [75]. Анализ спектров, приведенных на рисунке 3.11, показал, что параметры спектров отличаются минимально, зависимости практически идентичны.

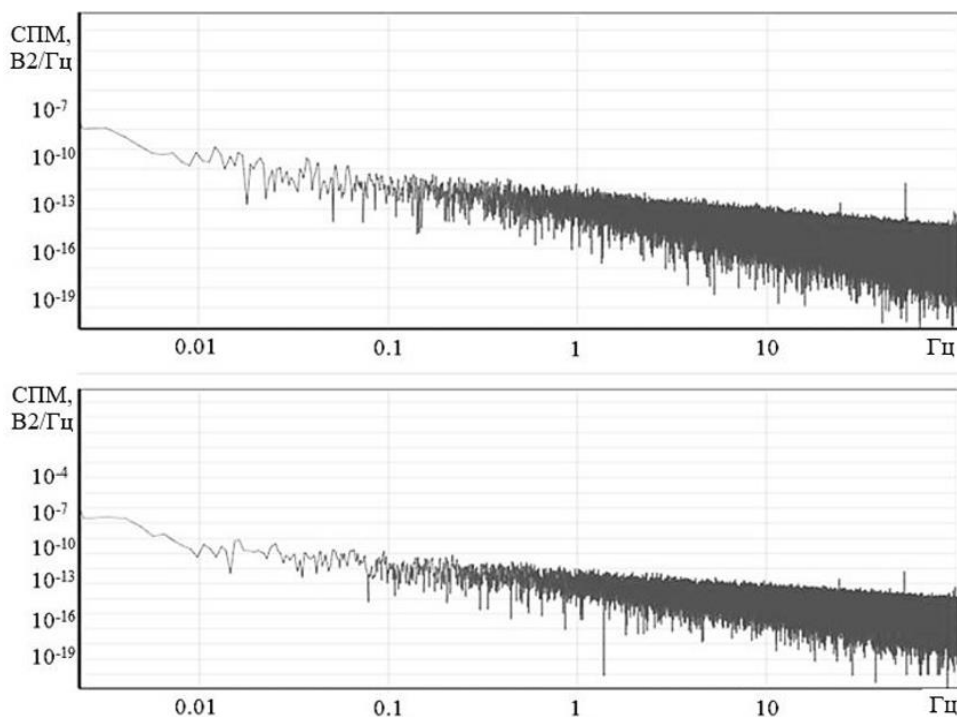


Рисунок 3.11 – Спектры НЧ шума образца 4.12 с использованием соленоида (электромагнитной катушки)

Материалы настоящего раздела опубликованы в работе [104].

3.3 Методические аспекты исследования структуры контактных пластин герконов с помощью электронной микроскопии

Растровая электронная микроскопия является методом исследования, в который основан на принципе формирования изображения объекта последовательно (по точкам) в результате взаимодействия электронного пучка (зонда) с поверхностью образца.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) является вакуумным прибором, поскольку при нормальном атмосферном давлении процессы рассеяния на молекулах газов воздуха затрудняют фокусировку электронного пучка. Поэтому рабочий вакуум в камере микроскопа поддерживается на уровне 10^{-5} Тор или лучше.

Схема основных блоков и узлов растрового электронного микроскопа приведена на рисунке 3.12. Специальная конденсорная система направляет на исследуемый образец электронный пучок в виде хорошо сфокусированного зонда от источника электронов путём прохождения через фокусирующую систему управляющих электродов (или электромагнитов). Система перемещает зонд по поверхности образца по заданной траектории, образующей растр, аналогичный телевизионному растру [108, 109].

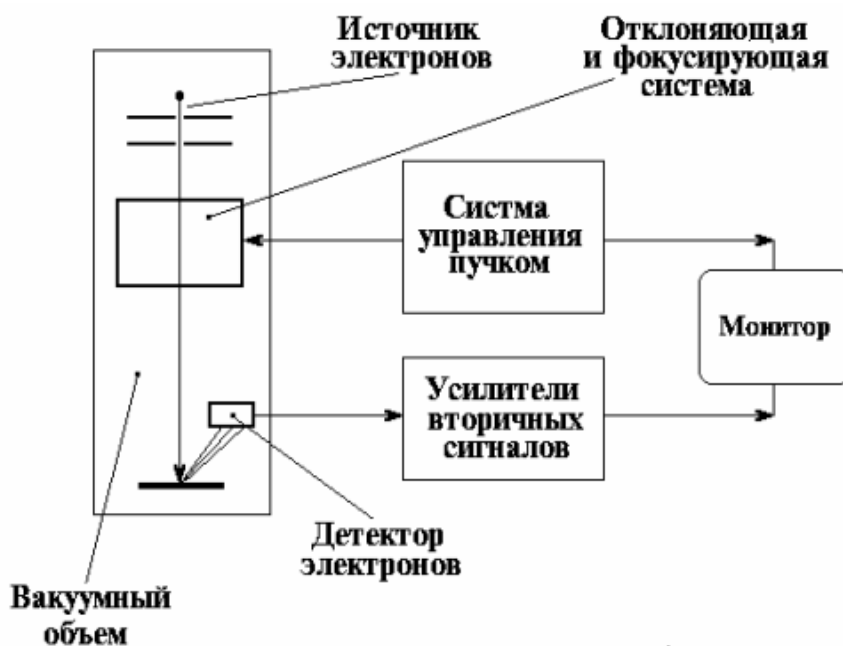


Рисунок 3.12 – Упрощенная схема, иллюстрирующая работу РЭМ [110]

Результат взаимодействия пучка электронов с поверхностью образца регистрируется соответствующими датчиками и в конечном итоге визуализируется. Получаемый датчиками сигнал используется в дальнейшем для модуляции яркости на экране монитора облучаемого участка. Величина вторичного сигнала зависит от физических свойств поверхности образца и

может меняться от точки к точке. В результате на экране монитора образуется изображение поверхности образца, отображающее топографию исследуемого физического свойства образца. Метод растровой электронной микроскопии позволяет исследовать, например, топологию поверхности (границы зерен, поры, трещины, неоднородности состава и др.) – в отраженных или вторичных электронах; распределение элементного состава по поверхности образца - в характеристическом рентгеновском излучении; топографию магнитной доменной структуры – во вторичных электронах и др.

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.

3.4 Последовательность экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования и многократная коммутация (искусственный износ) магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле проведены с помощью разработанного и реализованного автоматизированного измерительно-аналитического комплекса (раздел 3 настоящей диссертации).

Измерения спектров НЧ шума до и после коммутационных испытаний проведены в диапазоне частот от 0,01 до 100 Гц с усреднением результатов 10 измерений для каждого образца.

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

(изменения угла наклона аппроксимирующих прямых) с вычислением параметров – соответствующих показателей формы спектра β .

Ранее в разделе 2 на рисунке 2.16 представлен спектр НЧ шума разработанного измерительного комплекса. Максимальное значение спектральной плотности мощности комплекса во всех случаях было на 3-4 порядка величины меньше измеряемых значений СПМ образцов.

Режим работы измерительной установки подбирался экспериментально по виду зависимости СПМ шума. Рассмотрим примененные в настоящей работе методы обработки экспериментальных зависимостей. Результаты измерений спектров НЧ шума для образцов 1.2, 1.4, 1.8, представленных в таблице 3.1, приведены на рисунке 3.13.

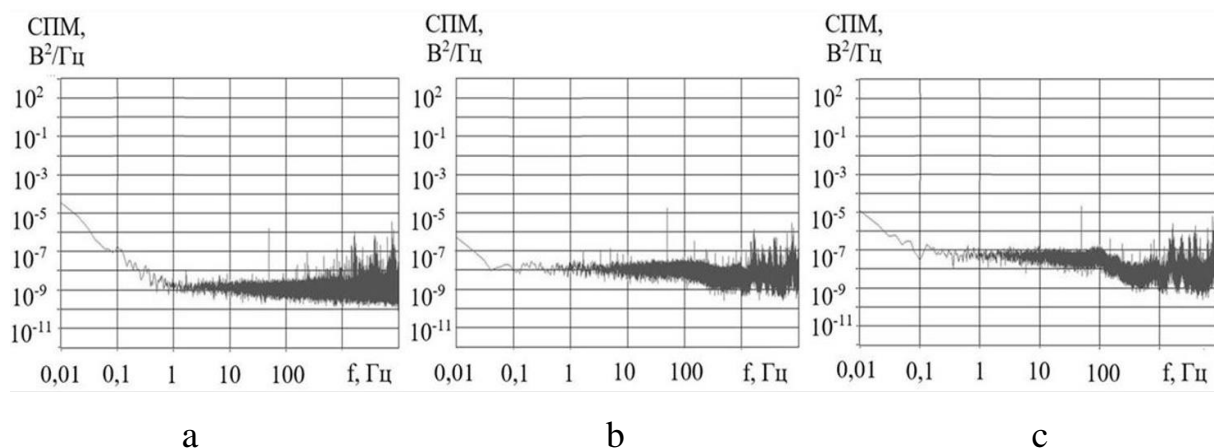


Рисунок 3.13 – Спектры НЧ шума образцов: а- 1.2; б-1.4; с-1.8

Спектры НЧ шума измеренных образцов измерялась при помощи начального варианта автоматизированного комплекса шумовой спектроскопии, подробное описание которого приведено в 2.1. Комплекс позволяет производить заданное число измерений одного образца, затем выводить усредненные данные для минимизации ошибок с помощью платы сбора данных. Массив данных в таком диапазоне частот составляет 1000000 точек измерения, обрабатываемый в среде LabView. В нашем случае наиболее интересным является диапазон частот от 0,01 до 100 Гц. В этом случае число точек уменьшается до 10000. 5 массивов данных по 10000

измерений в каждом были обработаны в среде математического моделирования MathCad.

Обработка представляла собой два вида аппроксимации СПМ НЧ шума на частоте до 1 Гц. Как описано в разделе 2, особый интерес вызывает шум типа $1/f^\beta$. Степень β обычно находится в диапазоне от 0,6 до 2,5 и по ней можно судить о природе НЧ шума. Для определения степени β полученные экспериментальные данные аппроксимировались с помощью линейной функции методом подбора коэффициентов, а затем для более точного анализа использовалась аппроксимация методом линейной регрессии. Таким образом, были получены значения степени β для каждого измеренного образца двумя различными методами. Результат аппроксимации полученных данных представлен на рисунках 3.14, 3.15.

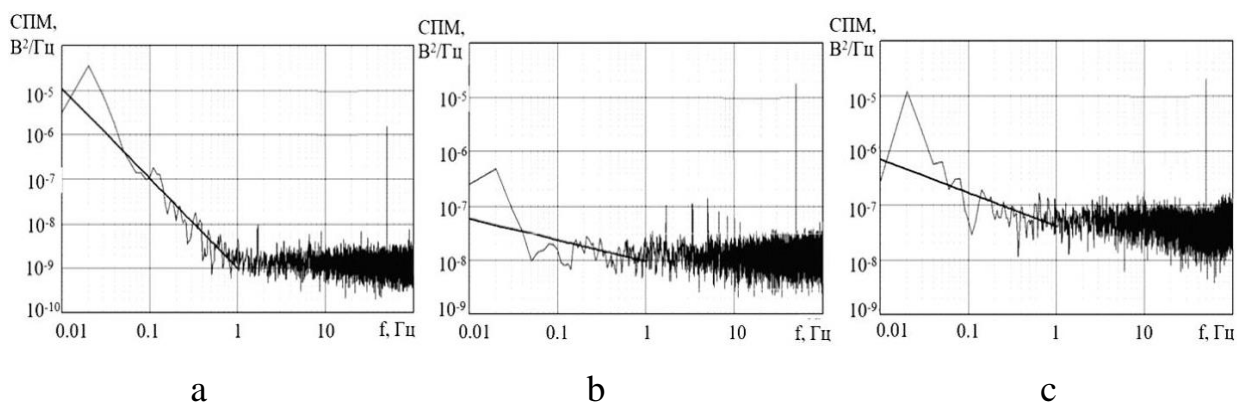


Рисунок 3.14 – Аппроксимация спектров НЧ шума образцов: а- 1.2; б-1.4; с-1.8 методом подбора коэффициентов

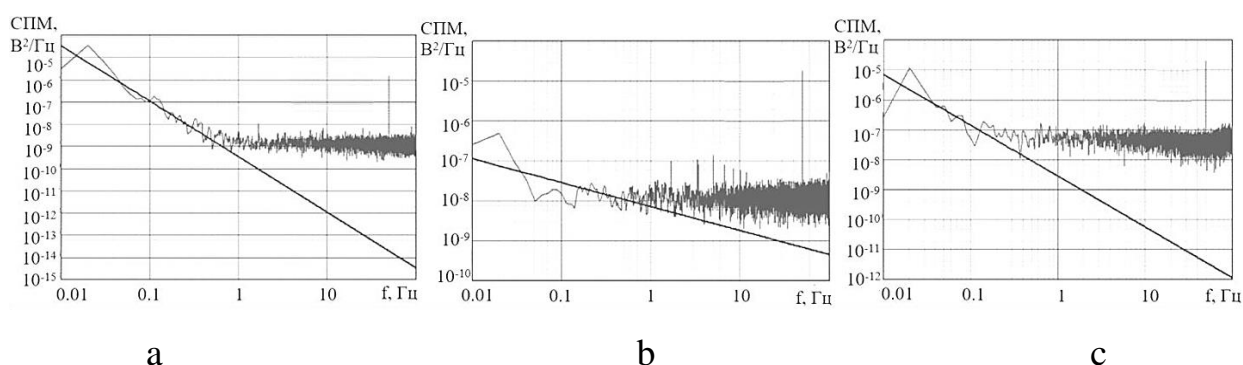


Рисунок 3.15 – Аппроксимация спектров НЧ шума образцов: а- 1.2; б-1.4; с-1.8 методом линейной регрессии

Значения показателя формы спектров β зависимости $S=1/f^\beta$, полученные путем аппроксимации экспериментальных данных методами подбора коэффициентов $\beta_{п.к}$ и линейной регрессии $\beta_{л.р.}$, представлены в таблице 3.7 [78, 79].

Таблица 3.7 – Результаты исследования и аппроксимации спектров НЧ шума герконов МКА-14103 партии 1

№ образца	Параметры				R, Ом	$\beta_{п.к.}$	$\beta_{л.р.}$	СПМ на частоте 1 Гц, В ² /Гц
	F _{ср.} , А	F _{от.} , А	U _{пр.} , В	Покрытие				
1.2	13	7	265	Au-Ru	0,08	2,5	2,4	$2.05 \cdot 10^{-9}$
1.4	12	7	275	Au-Ru	0,08	2,02	1,7	$7.34 \cdot 10^{-9}$
1.8	15	6	305	Fe	0,16	0,6	0,6	$5.22 \cdot 10^{-8}$

Для исследования состава и морфологии поверхности контактов из каждой партии выделялись образцы, имеющие примерно одинаковую СПМ и форму спектров НЧ шума. Как правило, и площади пятен контактной эрозии анода и катода оказывались близкими по размерам.

При изучении возможности применения вариации (отклонения) Аллана для оценки стационарности случайного процесса был проведен эксперимент с измерением спектров НЧ шума партии из 10 магнитоуправляемых контактов (герконов) марки МКА-14103 с низким и высоким разрешением, длительностью 3 и 25 минут соответственно [114]. Измерение проводилось с помощью разработанных измерительно-аналитического комплекса и ранее описанного программного обеспечения.

После цифровой обработки получены спектры, представленные на рисунках 3.16 и 3.17. На рисунке 3.16 в качестве примера представлен спектр НЧ шума герконового контакта с высоким разрешением измерения, длительностью от 25 минут, а на рисунке 3.17 – спектр НЧ шума этого же контакта с низким разрешением измерения, длительностью 3 минуты.

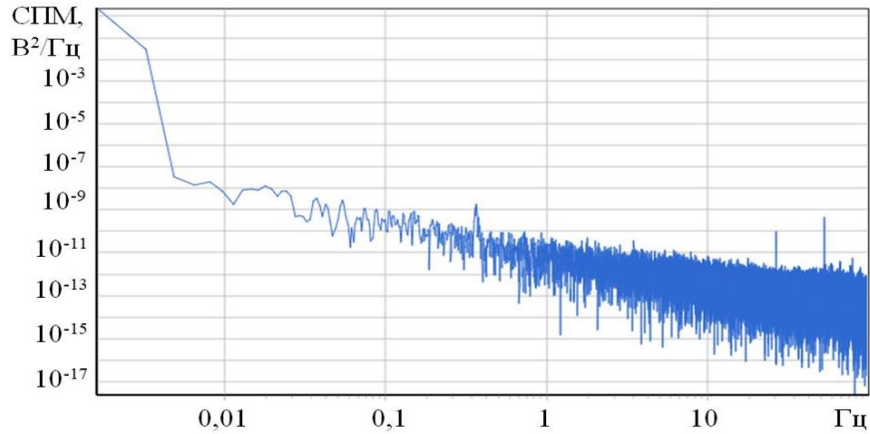


Рисунок 3.16 – Спектр НЧ шума геркона, измеренный с высоким разрешением

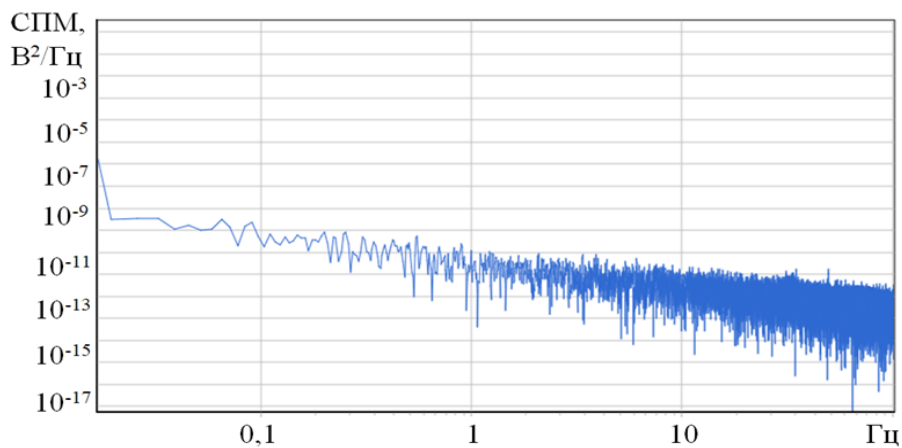


Рисунок 3.17 – Спектр НЧ шума геркона, измеренный с низким разрешением

Графические зависимости, иллюстрирующие вариации Аллана (Root AVAR), представлены на рисунках 3.18 и 3.19. Эти зависимости построены для спектров, приведенных на рисунках 3.16 и 3.17. Из результатов, приведенных на рисунках 3.18 и 3.19, следует, что в диапазоне времен, где отклонение Аллана не зависит от времени, нестационарный в целом процесс является стационарным в определенном диапазоне времен.

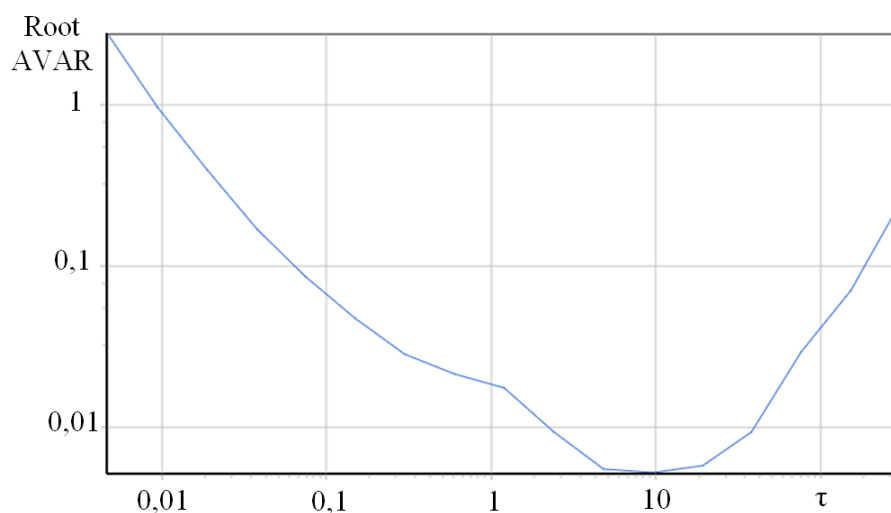


Рисунок 3.18 – График отклонения Аллана для спектра НЧ шума с высоким разрешением

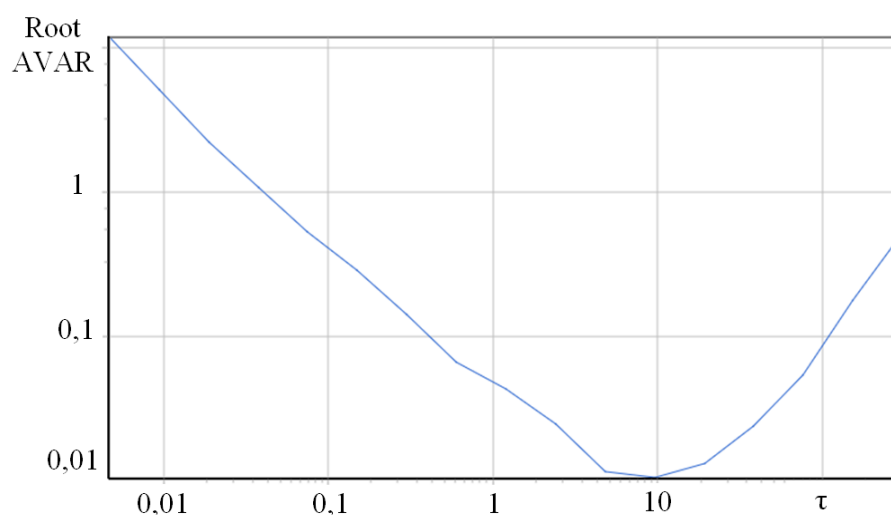


Рисунок 3.19 – График отклонения Аллана для спектра НЧ шума с низким разрешением

Анализ данных, показанный на рисунках 3.18 и 3.19 свидетельствует о том, что характер зависимостей вариации Аллана подобен для спектров НЧ шума с высоким и низким разрешением. Полученные результаты аналогичны для всех исследованных образцов. Для полученных спектров НЧ шума проведена аппроксимация двух необходимых для получения коэффициента β участков методом линейной регрессии [107]. После проведения аппроксимации для сравнения вычислен угол наклона аппроксимирующих прямых и получен коэффициент β зависимости $1/f^\beta$ (рисунки 3.20 и 3.21).

Из рисунков 3.20 и 3.21 видно, что углы наклона и коэффициенты β близки по величине для спектров НЧ шума 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 [111].

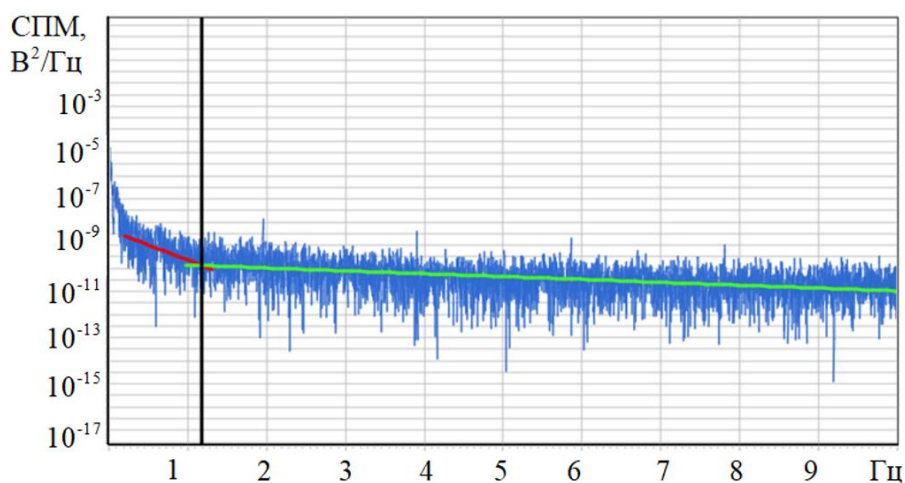


Рисунок 3.20 – Аппроксимация спектра с высоким разрешением

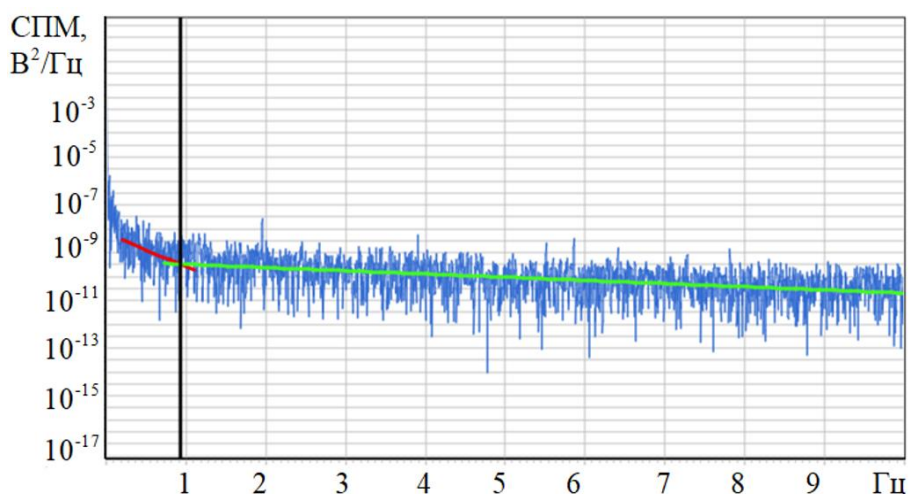


Рисунок 3.21 – Аппроксимация спектра с низким разрешением

Таким образом, данные экспресс-диагностики выборки из 10 низкоомных коммутационных устройств методом спектроскопии НЧ шума

длительностью менее 5 минут (с низким разрешением) с последующей обработкой результатов с помощью вариации Аллана и анализа Фурье более чем на 90% совпадают с результатами более длительной диагностики с высоким разрешением [111].

Выводы

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.

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%. Наблюдаемая девиация контактного сопротивления связана 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. Аналогичные результаты получены при исследовании электромагнитных реле АХІСОМ ІМ06.

Данные по экспресс-диагностике низкоомных коммутационных устройств методом спектроскопии НЧ шума длительностью менее 5 минут (с низким разрешением) с последующей обработкой результатов с помощью вариации Аллана и анализа Фурье более чем на 90% совпадают с результатами более длительной диагностики продолжительностью 30 минут и более с высоким разрешением.

Обработка измеренных значений параметров спектров НЧ шума образцов производилась в среде MathCad. Для сглаживания графиков

зависимостей использованы методы подбора коэффициентов и регрессия линейной комбинацией функций скалярного аргумента (*linfit*).

Разработаны методика и последовательность экспериментальных исследований параметров и характеристик низкоомных коммутационных компонентов.

4 Исследование параметров и характеристик низкочастотного шума коммутационных компонентов

4.1 Исследование влияния покрытий контактов герконов сплавами Au-Ru на спектры низкочастотного шума

В настоящей работе автором исследовались партии образцов, параметры которых приведены в разделе 3.1. Исследования проведены при помощи измерительно-аналитического комплекса с программным обеспечением, которые представлены в разделе 2 настоящей диссертации.

Состав материала контактных пластин и покрытия определен на основе результатов их исследования при помощи растровой электронной микроскопии. Спектры химического состава контактных пластин представлены на рисунках 4.1 и 4.2. Для каждого измеренного образца была исследована поверхность анода и катода при помощи растрового электронного микроскопа (рисунки 4.3, 4.4).

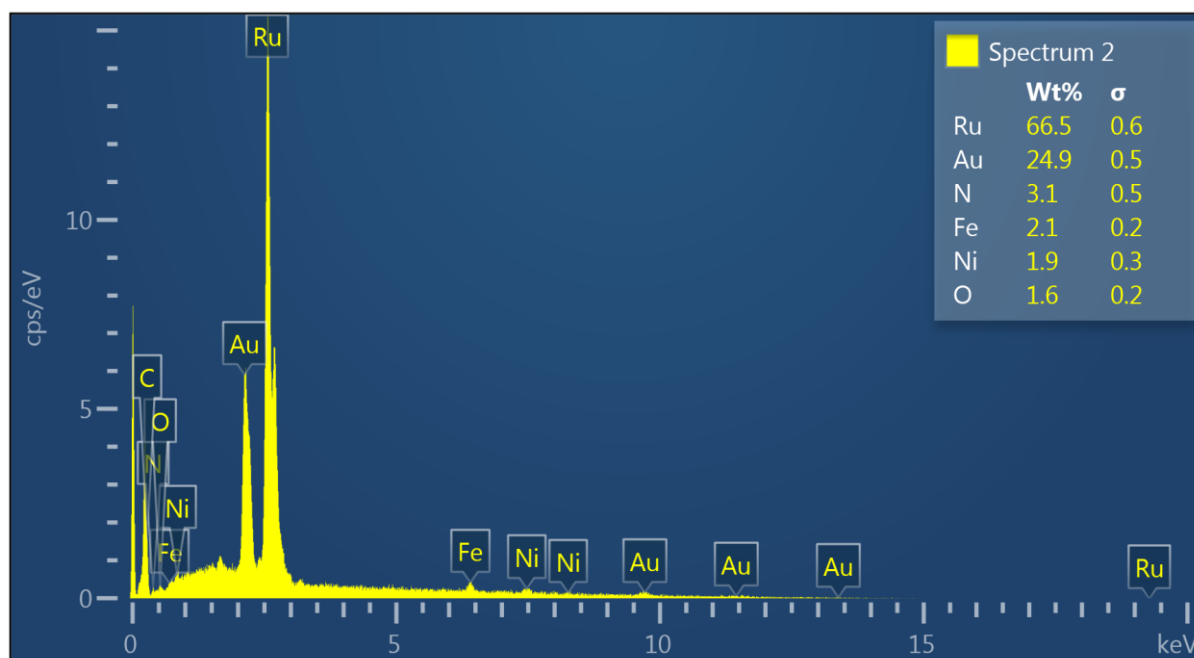


Рисунок 4.1 - Спектр состава образца 4.1

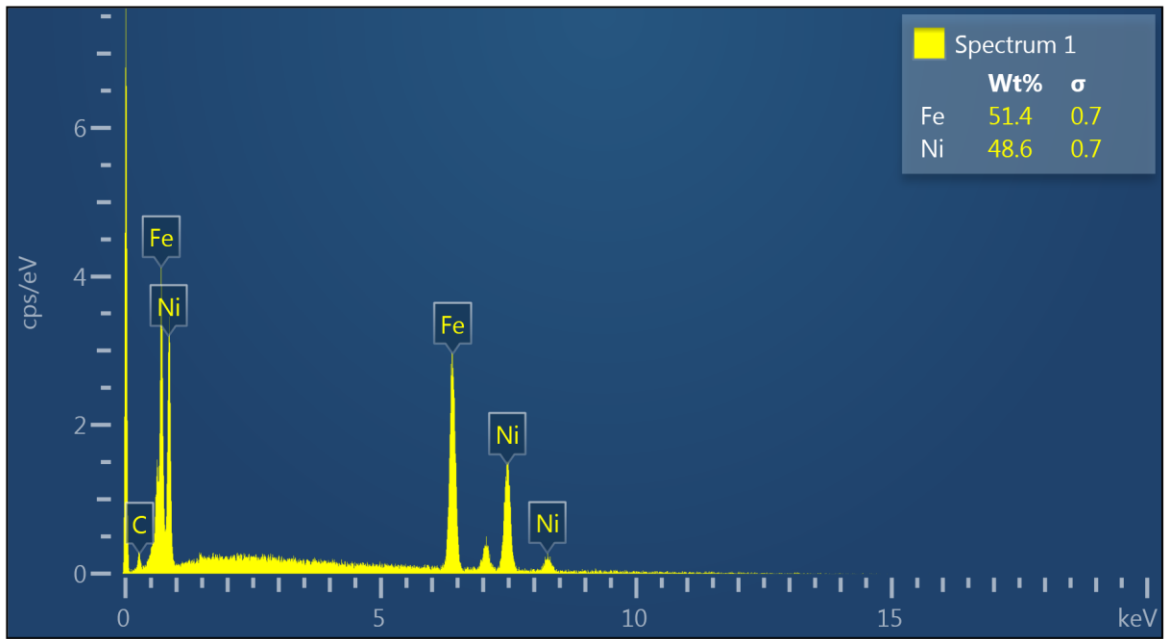


Рисунок 4.2 - Спектр состава образца 5.1

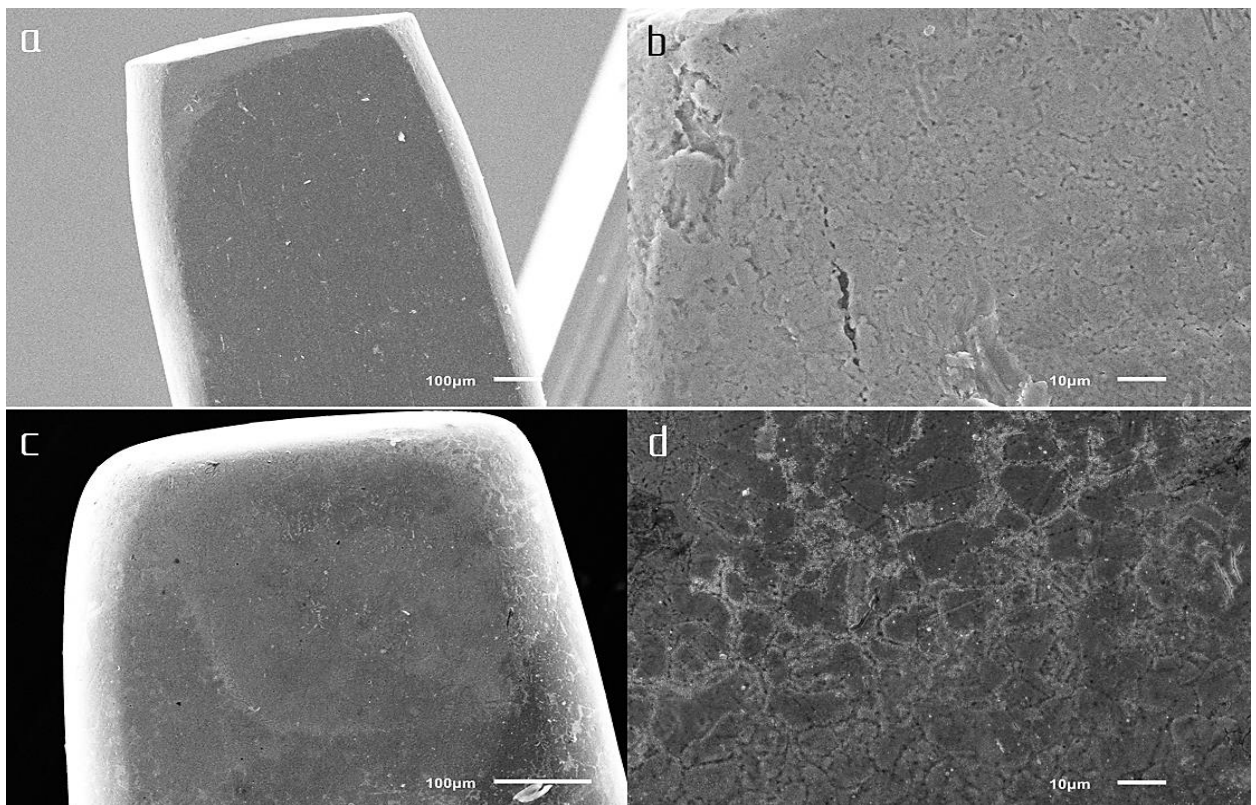


Рисунок 4.3 – РЭМ- изображение поверхности анода магнитоуправляемого контакта: а, b - из пермаллоя (образец 5.1); с, d – с покрытием Au-Ru (образец 4.1)

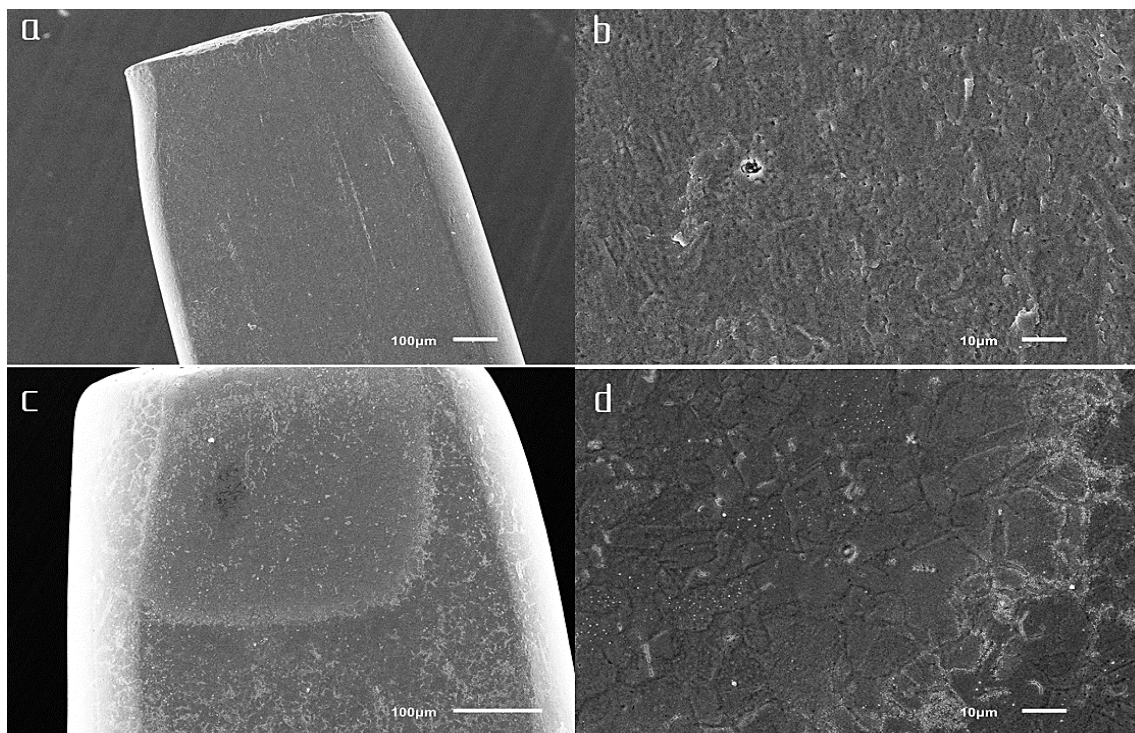


Рисунок 4.4 – РЭМ- изображение поверхности катода магнитоуправляемого контакта: а, b - из пермаллоя (образец 5.1); с, d – с покрытием Au-Ru (образец 4.1)

При прохождении электрического тока через замкнутый магнитоуправляемый контакт большую роль играет площадь контакта и однородность поверхности. Из рисунков 4.3-4.4 следует, что у пермаллоевых контактов поверхность более затронута контактной эрозией по сравнению с контактами, покрытыми Au-Ru. Указанная причина влияет на площадь соприкосновения анода и катода.

На рисунке 4.5 приведены спектры НЧ шума герконов, контактные пластины которых были изготовлены из низкоконикелевого пермаллоя, а также после нанесения гальванического покрытия из сплава Au-Ru.

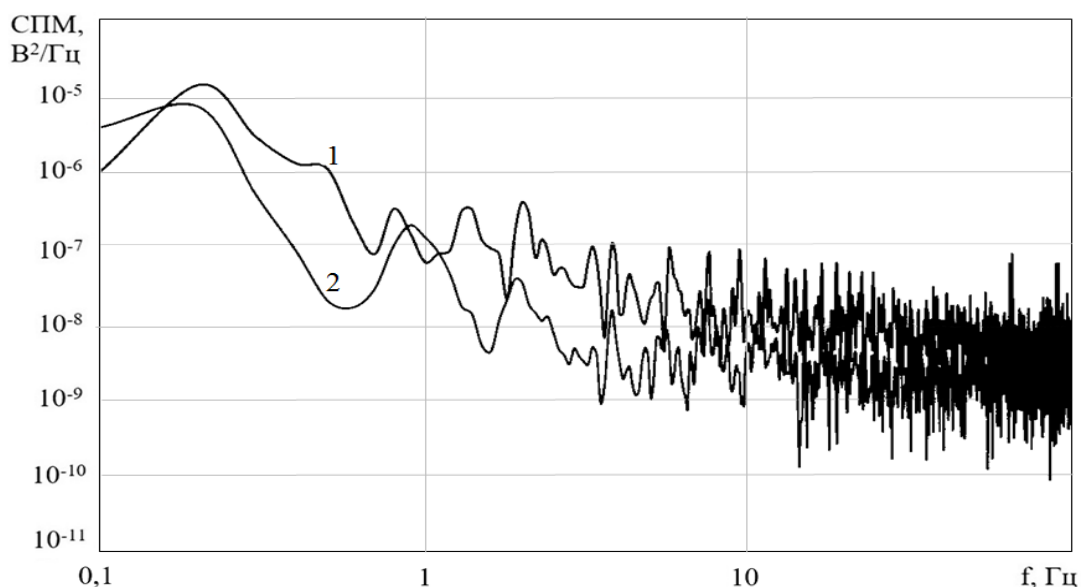


Рисунок 4.5 - Спектры НЧ шума герконов: 1 – без покрытия (образец 4.10);
2 – с покрытием контактных пластин слоем Au-Ru (образец 4.3)

Анализ показал, что нанесение покрытия Au-Ru снижает СПМ НЧ шума в среднем на 1-1,5 порядка, по-видимому, за счет повышения инертности поверхности контактных пластин, на которых возможно образование диэлектрических пленок. Кроме того, анализ РЭМ изображения поверхностного покрытия позволяет утверждать, что зерна поликристаллического сплава Au-Ru имеют меньшие размеры по сравнению с зернами сплава Fe-Ni.

Как отмечалось ранее, одним из наиболее важных параметров магнитоуправляемых контактов является контактное сопротивление, поэтому величина $R_{\text{к}}$ контролировалась на всех этапах эксперимента. Значение контактного сопротивления определялось по результатам измерений по схеме четырехполюсника в соответствии с методикой, описанной в разделе 3.1.

Результаты исследования образцов 1-й и 2-й партий представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

Нанесение покрытия Au-Ru снижает величину контактного сопротивления герконов в среднем в 1,5-2 раза, показателя формы спектра НЧ шума – на 30-50% (таблицы 4.1, 4.2).

Таблица 4.1 – Значения контактного сопротивления и параметры спектров НЧ шума герконов МКА-14103 партии 1 с покрытием Au-Ru и без покрытия пермалловых контактных пластин

№	$R_{п}, \text{ Ом}$	СПМ, $\text{В}^2/\text{Гц}$	Материал контактов
1	0,08	$2.05 \cdot 10^{-9}$	пермаллой с покрытием Au-Ru
2	0,08	$7.34 \cdot 10^{-9}$	пермаллой с покрытием Au-Ru
3	0,16	$5.22 \cdot 10^{-8}$	пермаллой
4	0,12	$8.91 \cdot 10^{-8}$	пермаллой
5	0,11	$2.43 \cdot 10^{-8}$	пермаллой

Таблица 4.2 – Значения контактного сопротивления и параметры спектров НЧ шума герконов МКА-14103 партии 2 с покрытием Au-Ru контактных пластин

№	$R_{п}, \text{ Ом}$	СПМ $\cdot 10^{-9}$, $\text{В}^2/\text{Гц}$	β
1	0,08	5,64	1,02
2	0,08	178	0,65
3	0,08	7,93	0,31
4	0,08	32,1	1,21
5	0,08	19,7	1,23
6	0,11	32,7	0,54
7	0,11	2,93	2,02
8	0,16	5,64	1,83
9	0,12	6,52	1,04
10	0,15	12,8	1,58

Покрытие контактных пластин сплавом Au-Ru ставит своей целью повышение надежности геркона и снижение значения переходного сопротивления за счет обеспечения химической инертности и стабильности во времени рабочей контактирующей поверхности [112]. Наши экспериментальные результаты свидетельствуют о снижении СПМ НЧ шума в случае покрытия контактных пластин сплавом Au-Ru на 1-1,5 порядка (10-

17 дБ), т.е. улучшении прогноза ресурса их работы за счет более стабильных характеристик.

4.2 Исследование взаимосвязи величины контактного сопротивления с параметрами спектров НЧ шума

Как отмечалось в разделе 1.3, рост плотности мощности НЧ шума проводниковых материалов может быть обусловлен снижением подвижности электронов вследствие повышенной концентрации дефектов структуры. К такому же результату приводит и рост контактного сопротивления.

Поскольку важнейшим параметром герконов является их контактное сопротивление, в работе сопоставлены значения контактного сопротивления с параметрами спектров НЧ шума. Исследования проведены на образцах, параметры которых указаны в таблицах 3.1-3.6.

В представленных выше таблицах 4.1 и 4.2 приведены значения контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов, коэффициента формы спектра β и СПМ НЧ шума на частоте 0,1 Гц. Графические зависимости сопоставления указанных параметров для образцов магнитоуправляемых контактов разных партий представлены на рисунках 4.6- 4.9.

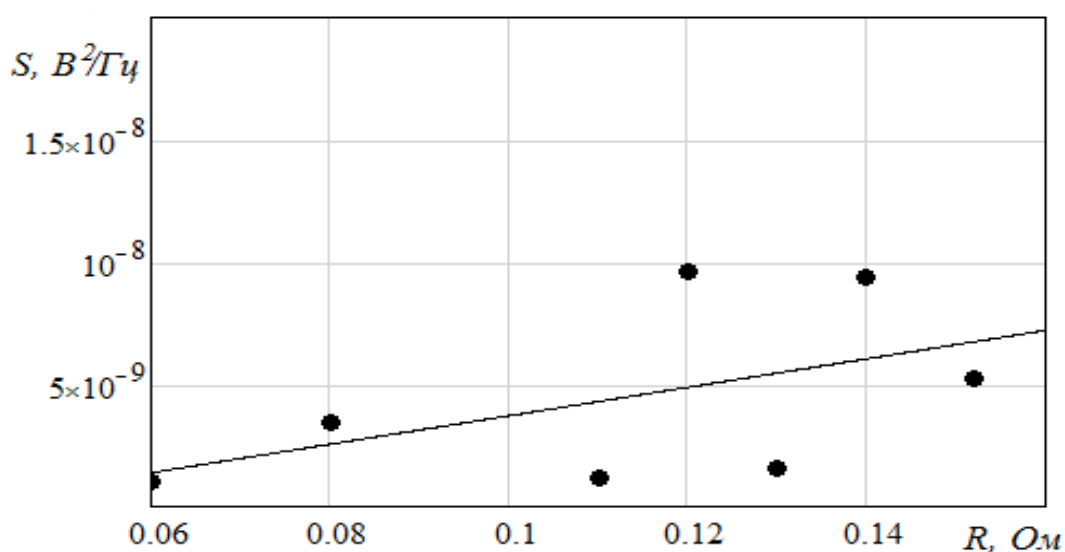


Рисунок 4.6 - Зависимость СПМ НЧ шума на частоте 0,1 Гц от контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов партии 1

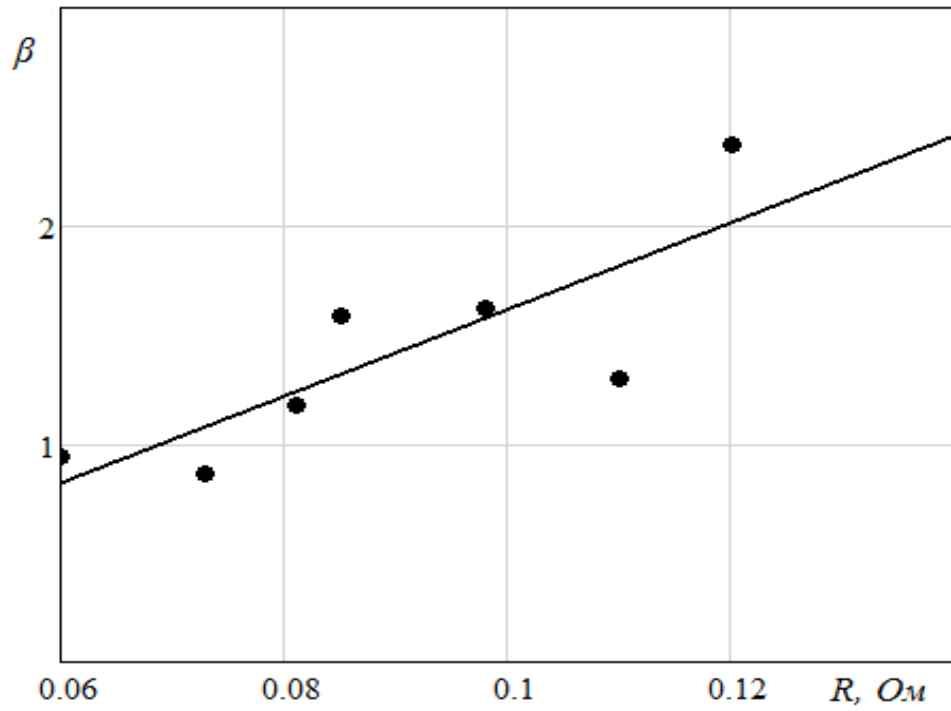


Рисунок 4.7 - Зависимость коэффициента формы спектра β от контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов партии 2

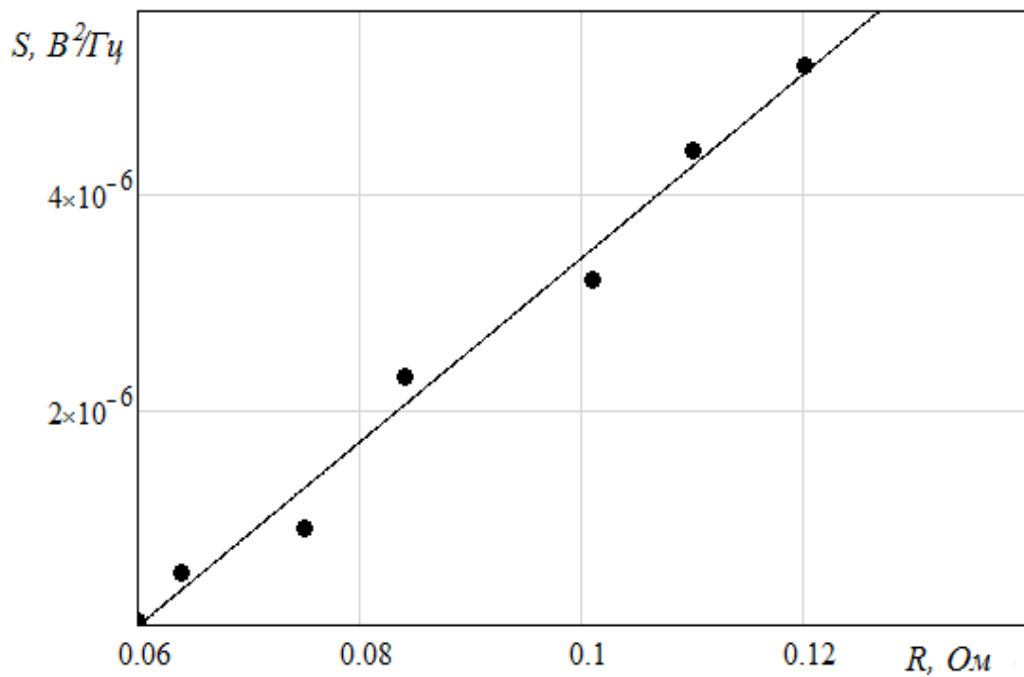


Рисунок 4.8 - Зависимость СПМ НЧ шума на частоте 0,01 Гц от контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов партии 2

Анализ представленных выше зависимостей показал, что для образцов исследованных партий с ростом контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов возрастают спектральная плотность мощности и коэффициент формы спектра НЧ шума β . Можно предположить, что причиной роста указанных параметров является повышенная дефектность материала.

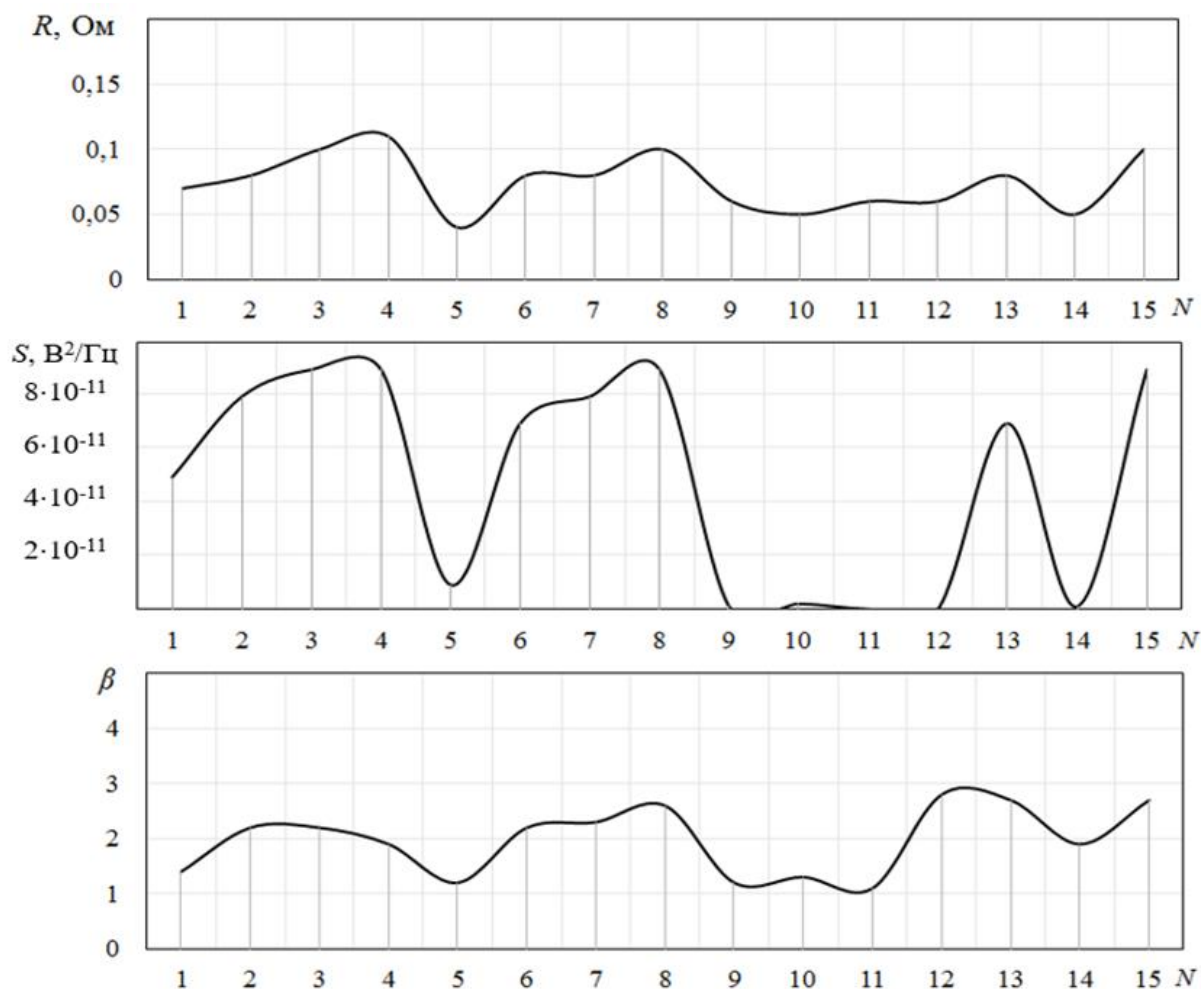
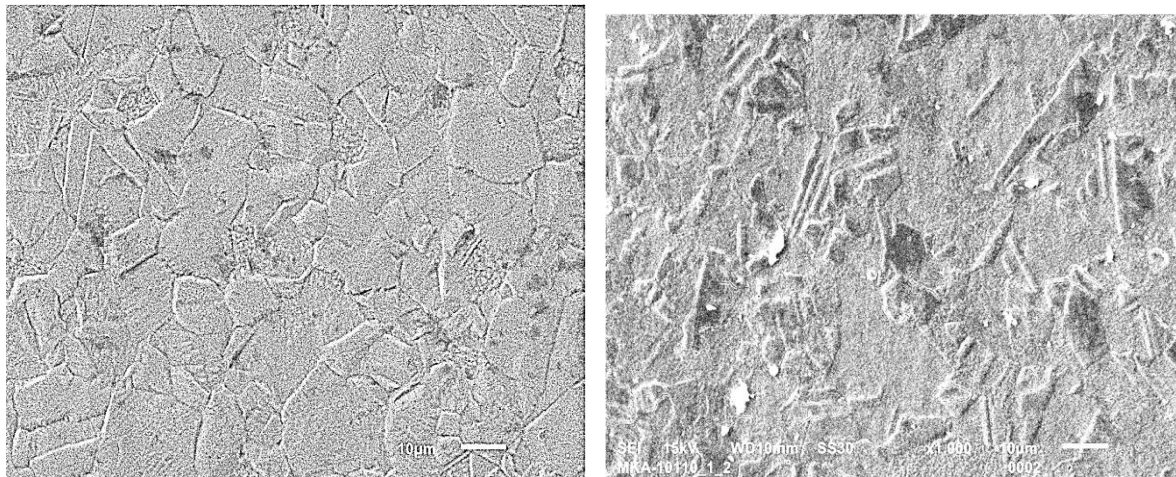


Рисунок 4.9 - Сопоставление значений β , СПМ НЧ шума и R для 15-ти образцов 5-й партии (N – номер образца)

Следует отметить, что рост контактного сопротивления сопровождается, как правило, ростом размеров зерна поликристаллического материала контактных пластин. Один из примеров РЭМ-изображения поликристаллической структуры контактов представлен на рисунке 4.10. Как отмечалось, контактные пластины изготовлены из железоникелевого сплава –

пермаллоя. Компоненты сплава обладают неограниченной растворимостью и образуют твердые растворы замещения. К сожалению, не на всех снимках хорошо различимы размеры поликристаллов сплавов. В среднем линейные размеры поликристаллов составляют около 10 мкм (рис. 4.10).



а

б

Рисунок 4.10- РЭМ-изображение поликристаллической структуры поверхности образцов: а- 5.4 с пермаллоевыми контактами;
б- 4.3 с пермаллоевыми контактами, покрытыми слоем Au-Ru

4.3 Исследование влияния искусственного износа на характеристики НЧ шума магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле

В разделе 1.4 отмечалось, что для эффективного применения шумовой диагностики авторы большинства работ [10, 15, 16] и др. предлагают применять специальное (обычно экстремальное) воздействие с целью выявления потенциальной опасности отказа компонента. При этом параметры спектров НЧ шума исследователи возможностей шумовой диагностики измеряли до и после воздействия.

В настоящей работе в качестве тестового воздействия применена многократная коммутация магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле всех исследованных партий как имитация

естественного износа. Реализованная в большинстве работ идея применения экстремального воздействия для выяснения потенциально ненадежных компонентов методом шумовой диагностики преобразована автором диссертации в идею использования функционального воздействия разной степени жесткости на коммутационные устройства. Кроме того, исследовано влияние восстановительной технологической обработки на характеристики НЧ шума магнитоуправляемых контактов, то есть функционального воздействия, предположительно улучшающего характеристики.

Количество замыканий, которым подвергались герконы и электромагнитные реле при проведении коммутационных испытаний, составило от 10^3 до 10^6 при величинах тока 0,1 - 0,3 А и частоте коммутации 20 – 100 Гц. Структура поверхности контактных пластин до и после коммутации исследована при помощи РЭМ. Экспериментальное изучение характеристик низкоомных объектов - коммутационных устройств проводилось в следующей последовательности:

- измерение спектров НЧ шума исходных образцов и обработка полученных результатов;
- искусственный износ контактов путем многократной коммутации при различных режимах работы;
- измерение спектров НЧ шума искусственно изношенных магнитоуправляемых контактов и реле, обработка результатов;
- исследование материала контактов при помощи растровой электронной микроскопии;
- анализ полученных результатов.

В настоящем разделе представлены результаты коммутационных испытаний и изучения структуры при помощи РЭМ образцов магнитоуправляемых контактов 2-й и 5-й партий, а также коммутационных испытаний партии реле.

В таблице 4.3 представлены результаты коммутационных испытаний, которым подвергались герконы 5-й партии.

Таблица 4.3 – Режимы и результаты коммутационных испытаний образцов 5-й партии

№ Геркона	Данные до испытаний			Данные после испытаний						
	Коэф. в	fпер, Гц	Угол, Град	Коэф. в	f перегиба, Гц	Угол аппр., Град.	I при испытании, А	Кол-во срабатываний	f ком мутаций, Гц	R до/после испытаний, Ом
Измерение параметров без коммутационных испытаний										
1	-	-	-	1,17	1,51	34,54	0,1	0	0	0,08
2	-	-	-	1,16	1,48	35,56	0,1	0	0	0,07
3	-	-	-	1,41	1,57	41,88	0,1	0	0	0,11
Коммутация 1000 раз при токе 0,1 А при частоте коммутации 10 Гц										
4	1,15	1,26	36,56	1,88	1,13	50,3	0,1	1000	10	0,12/0,14
5	1,29	1,61	39,89	1,43	1,73	43,95	0,1	1000	10	0,08/0,09
6	1,53	1,34	43,09	1,35	1,23	39,25	0,1	1000	10	0,08/0,1
Коммутация еще 1000 раз при токе 0,2 А при частоте коммутации 10 Гц										
4	-	-	-	2,31	1,21	54,31	0,2	2000	10	0,14/0,15
5	-	-	-	2,11	1,28	52,58	0,2	2000	10	0,09/0,1
6	-	-	-	2,33	1,05	54,98	0,2	2000	10	0,1/0,16
Коммутация 10000 раз при токе 0,1 А при частоте коммутации 20 Гц										
7	1,85	1,20	47,41	1,62	1,44	45,85	0,1	10000	20	0,07/0,1
8	0,94	1,94	28,64	1,3	1,38	38,68	0,1	10000	20	0,06/0,11
9	1,78	1,26	47,06	1,89	1,23	48,12	0,1	10000	20	0,13/0,16
Коммутация еще 10000 раз при токе 0,2 А при частоте коммутации 20 Гц										
7	-	-	-	2,04	1,31	52,58	0,2	20000	20	0,1/0,1
8	-	-	-	2,37	0,85	52,74	0,2	20000	20	0,11/0,12
9	-	-	-	3,02	0,97	59,21	0,2	20000	20	0,16/0,19
Коммутация 100000 раз при токе 0,1 А при частоте коммутации 50 Гц										
10	1,95	1,19	50,98	3,08	0,91	59,03	0,1	100000	50	0,11/0,18
11	2,17	1,73	52,88	3,13	1,02	60,11	0,1	100000	50	0,14/0,19
12	2,0	1,17	49,65	3,41	0,82	61,28	0,1	100000	50	0,1/0,21
Коммутация еще 100000 раз при токе 0,2 А при частоте коммутации 50 Гц										
10	-	-	-	3,64	0,81	62,03	0,2	20000	50	0,18/0,2
11	-	-	-	4,06	0,76	63,26	0,2	20000	50	0,19/0,22
12	-	-	-	3,5	0,96	61,54	0,2	20000	50	0,21/0,21
Коммутация 1000-10000-100000 при токе 0,1 А с частотой 20 Гц										
13	1,38	1,70	42,35	1,21	2,14	37,77	0,1	1000	20	0,05/0,05
13	-	-	-	2,26	1,06	54,88	0,1	10000	20	0,05/0,05
13	-	-	-	2,84	0,98	58,67	0,1	100000	20	0,05/0,07
14	1,62	1,56	46,45	1,33	1,81	39,14	0,1	1000	20	0,12/0,13
14	-	-	-	2,41	0,96	55,16	0,1	10000	20	0,13/0,13
14	-	-	-	2,67	0,96	56,4	0,1	100000	20	0,13/0,15
15	2,06	1,23	51,52	1,99	1,17	49,58	0,1	1000	20	0,08/0,08
15	-	-	-	2,28	1,11	53,14	0,1	10000	20	0,08/0,09
15	-	-	-	2,87	0,83	57,95	0,1	100000	20	0,09/0,14
Коммутация 1000 раз при токе 0,3 А при частоте коммутации 100 Гц										
13	-	-	-	0,45	6,43	11,4	0,3	100000	100	0,07/0,33
14	-	-	-	0,1	4,38	18,58	0,3	100000	100	0,15/0,5
15	-	-	-	0,86	2,17	28,06	0,3	100000	100	0,14/1,1

В таблице 4.4 представлены результаты коммутационных испытаний, которым подвергались реле AXICOM IM06. Разработанный комплекс позволяет проводить коммутационные испытания как на магнитоуправляемых контактах, так и на электромагнитных реле. Благодаря этому удалось получить экспериментальные данные по характеристикам НЧ шума партии электромагнитных реле.

Таблица 4.4 – Режимы и результаты коммутационных испытаний электромагнитных реле AXICOM IM06

№ Реле	Коэф. β	f _{пер} , Гц	угол, Град	СПМ, В ² /Гц на f=1 Гц	Сопротивление, Ом
Результаты до испытаний					
1	1.74	1.41	46.7	$5.5 \cdot 10^{-13}$	0,02
2	1.84	1.22	48.2	$2.7 \cdot 10^{-13}$	0,02
3	1.99	1.10	51.9	$4.3 \cdot 10^{-13}$	0,03
4	1.55	1.30	45.4	$2.1 \cdot 10^{-13}$	0,04
5	1.51	1.32	41.5	$2.9 \cdot 10^{-13}$	0,02
Коммутационные испытания: 5000 срабатываний при I=0,2 А (1/10 от max)					
1	2.21	1.24	54.2	$3.4 \cdot 10^{-13}$	0,05
2	2.42	1.14	55.3	$3.9 \cdot 10^{-13}$	0,06
3	2.32	1.27	53.7	$3.1 \cdot 10^{-13}$	0,04
4	2.02	1.22	50.5	$6.4 \cdot 10^{-13}$	0,05
5	2.08	1.19	52.8	$6.1 \cdot 10^{-13}$	0,05
Коммутационные испытания: 50000 срабатываний при I=0,2 А (1/10 от max)					
1	3.02	0.88	58.0	$9.4 \cdot 10^{-12}$	0,08
2	3.50	0.84	61.2	$8.1 \cdot 10^{-12}$	0,09
3	3.01	0.89	58.6	$9.8 \cdot 10^{-12}$	0,08
4	3.05	0.99	58.9	$8.9 \cdot 10^{-12}$	0,08
5	3.21	0.80	58.6	$9.1 \cdot 10^{-12}$	0,07
Коммутационные испытания: 500000 срабатываний при I=0,2 А (1/10 от max)					
1	4.24	0.96	69.9	$7.2 \cdot 10^{-12}$	0,14
2	3.90	1.07	69.8	$6.4 \cdot 10^{-12}$	0,11
3	5.34	0.89	72.7	$1.2 \cdot 10^{-12}$	0,14
4	4.43	0.75	64.6	$4.2 \cdot 10^{-12}$	0,12
5	3.93	0.83	62.7	$2.7 \cdot 10^{-12}$	0,12

Анализ экспериментальных результатов, приведенных в таблицах 4.3 и 4.4, свидетельствует о том, что при увеличении количества циклов коммутации наблюдался рост контактного сопротивления, спектральной плотности мощности и показателя формы спектра НЧ шума на самых низких частотах. На рисунке 4.11 в качестве примера представлен исходный спектр НЧ шума электромагнитного реле 6.2, а также спектры после коммутационных испытаний.

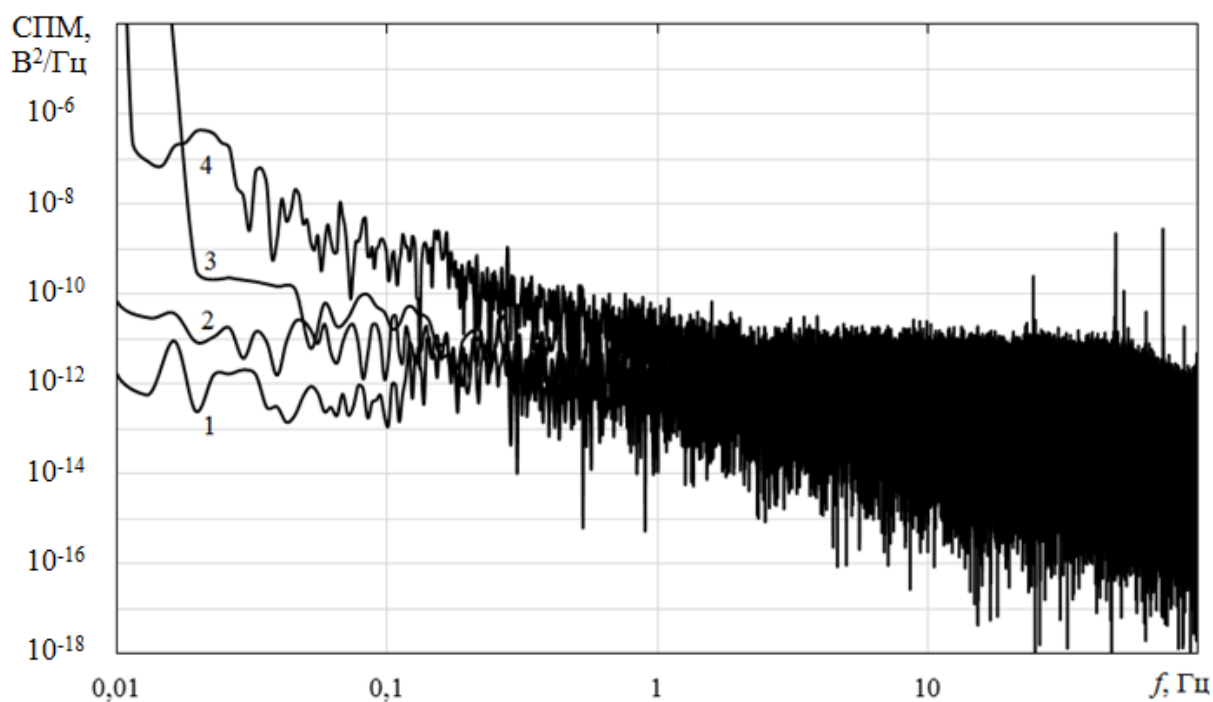


Рисунок 4.11 – Спектры НЧ шума реле 6.2: 1- до коммутационных испытаний; 2- после $5 \cdot 10^3$; 3 – после $5 \cdot 10^4$;
4 – после $5 \cdot 10^5$ циклов коммутации при величине тока 0,2 А

На рисунках 4.12 и 4.13 в качестве примера представлены исходные спектры НЧ шума образцов 5.7 и 5.8, а также после ряда циклов коммутации. Результаты свидетельствуют о росте СПМ НЧ шума и показателя формы спектра при увеличении числа циклов коммутации.

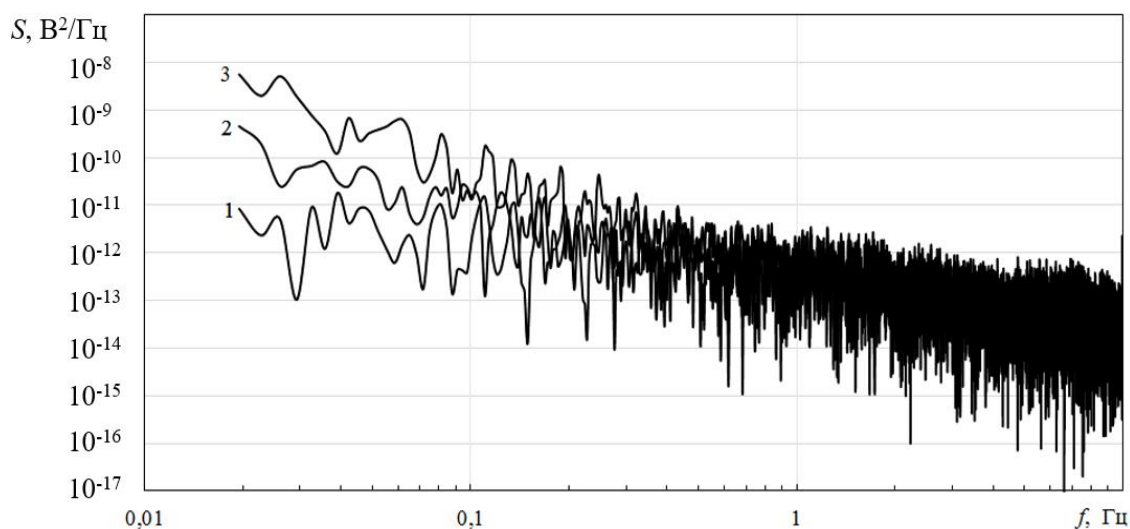


Рисунок 4.12 – Спектры НЧ шума: 1 - исходного магнитоуправляемого контакта (образец 5.8); 2 - после 10^3 ,
3 - после $5 \cdot 10^4$ циклов коммутации при величине тока 0,1 А

На рисунке 4.14 представлена зависимость СПМ НЧ шума для образца 2.2 от количества циклов коммутации n .

На рисунке 4.15 приведена зависимость показателя формы спектра β от количества циклов коммутации ряда магнитоуправляемых контактов 5-й партии. Наиболее значительный рост β отмечается при увеличении количества циклов искусственного износа герконов свыше 10^3 .

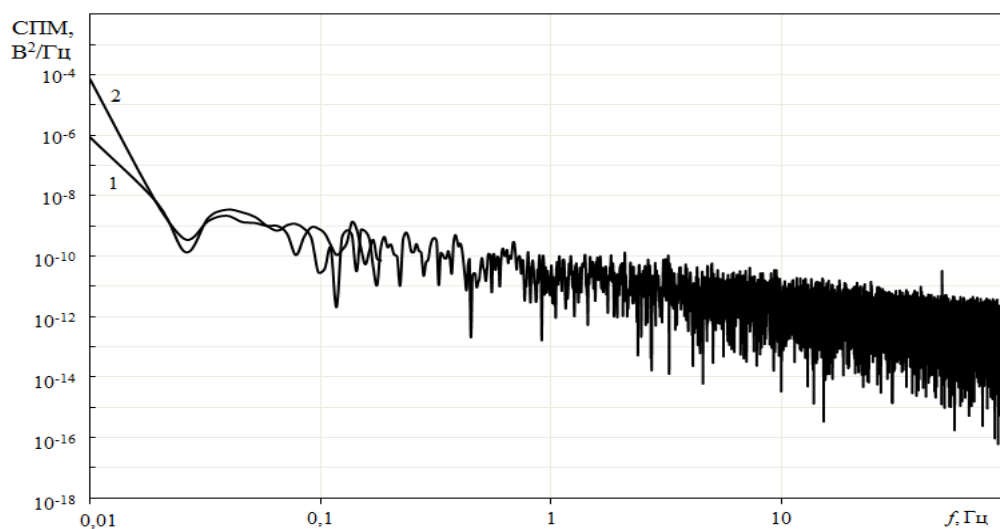


Рисунок 4.13 – Спектры НЧ шума: 1 - исходного магнитоуправляемого контакта (образец 5.14); 2 - после 10^5 циклов коммутации [113]

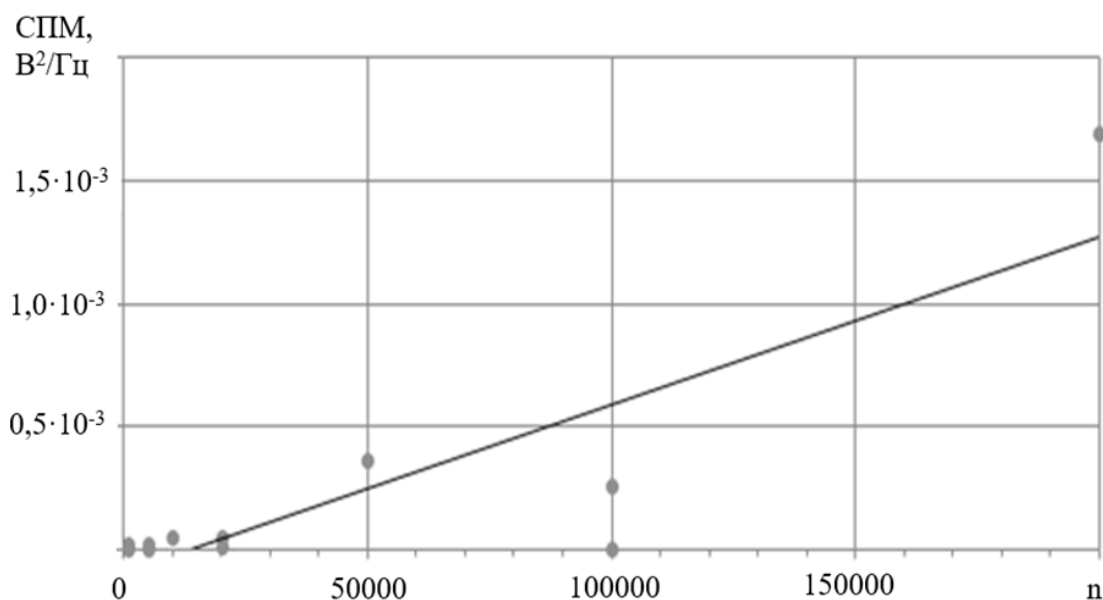


Рисунок 4.14 – Зависимость СПМ магнитоуправляемого контакта 2.2 от числа циклов коммутации на частоте 1 Гц

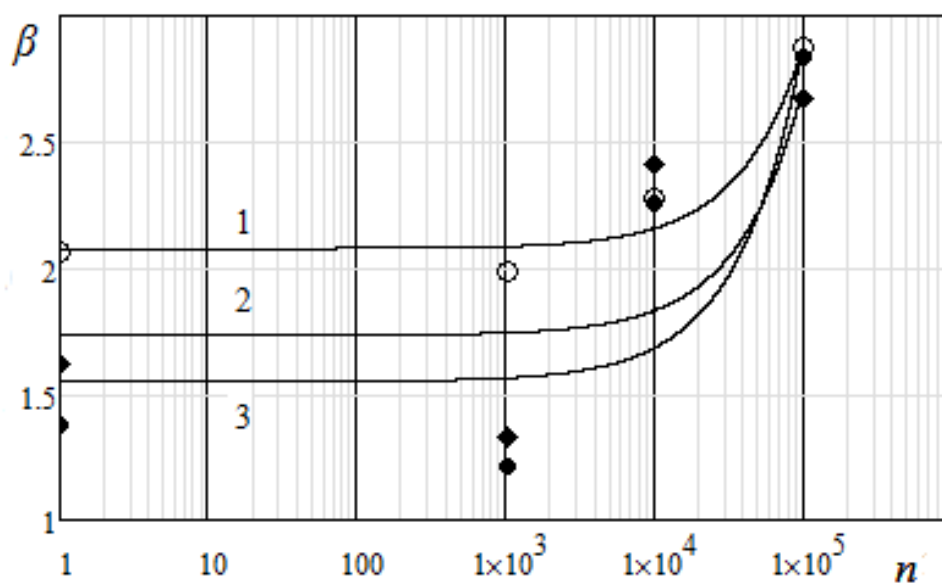


Рисунок 4.15 – Зависимость показателя формы спектра β образцов 1- 5.15; 2-5.14; 3-5.13 от числа циклов искусственного износа магнитоуправляемых контактов n [116]

На рисунке 4.16 приведены зависимости показателя формы спектра β и контактного сопротивления ряда герконов 5-й партии от количества циклов коммутации. Наиболее значительный рост β отмечается при увеличении количества циклов искусственного износа герконов свыше 10^3 .

Наиболее значительный рост контактного сопротивления и β отмечался при увеличении количества циклов искусственного износа герконов свыше 10^3 - 10^4 .

По-видимому, по мере искусственного износа контактов происходит рост рассеяния на дефектах структуры, в частности, на границе раздела проводящих покрытий, что приводит к росту числа флуктуаций подвижности и СПМ НЧ шума [13, 20, 38].

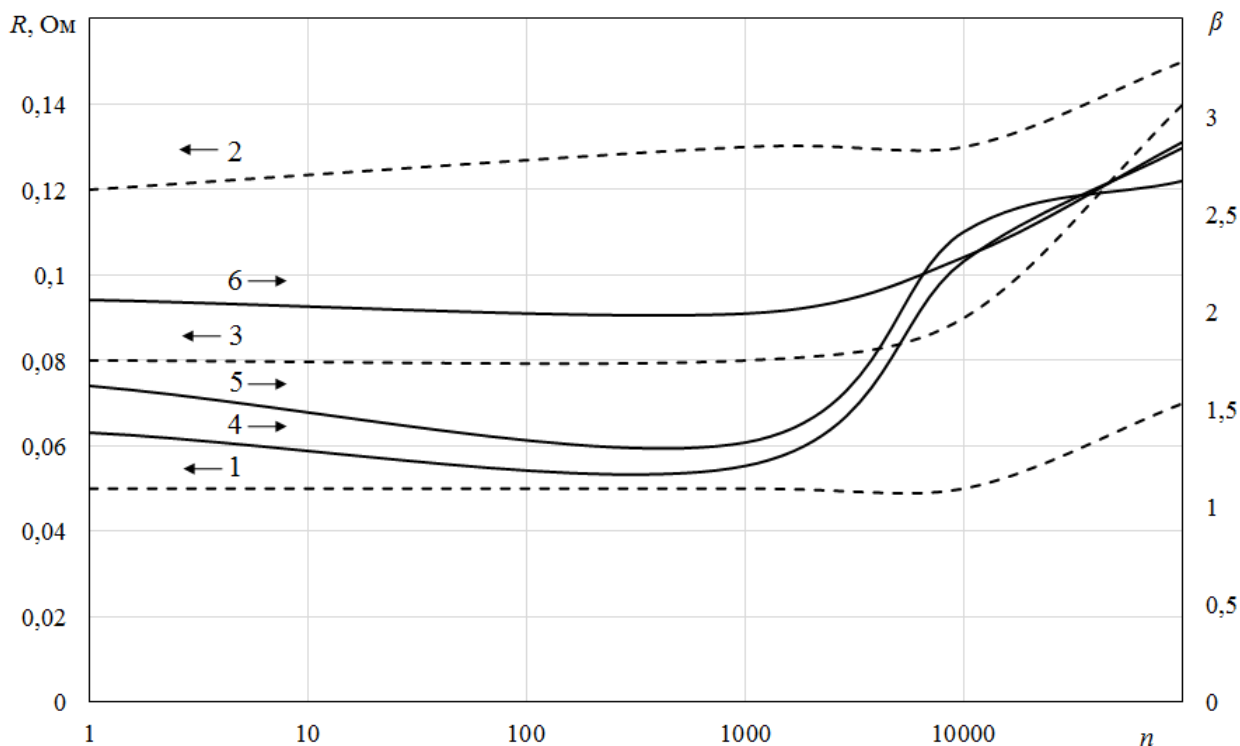


Рисунок 4.16 – Сопоставление зависимостей контактного сопротивления образцов герконов: 1- 5.13; 2-5.14; 3-5.15 и показателя формы спектра β : 4- 5.13; 5-5.14; 6-5.15 при изменении числа циклов искусственного износа магнитоуправляемых контактов n

На рисунках 4.17 – 4.19 приведены зависимости СПМ, показателя формы спектра НЧ шума β и контактного сопротивления от количества циклов коммутации ряда образцов электромагнитных реле.

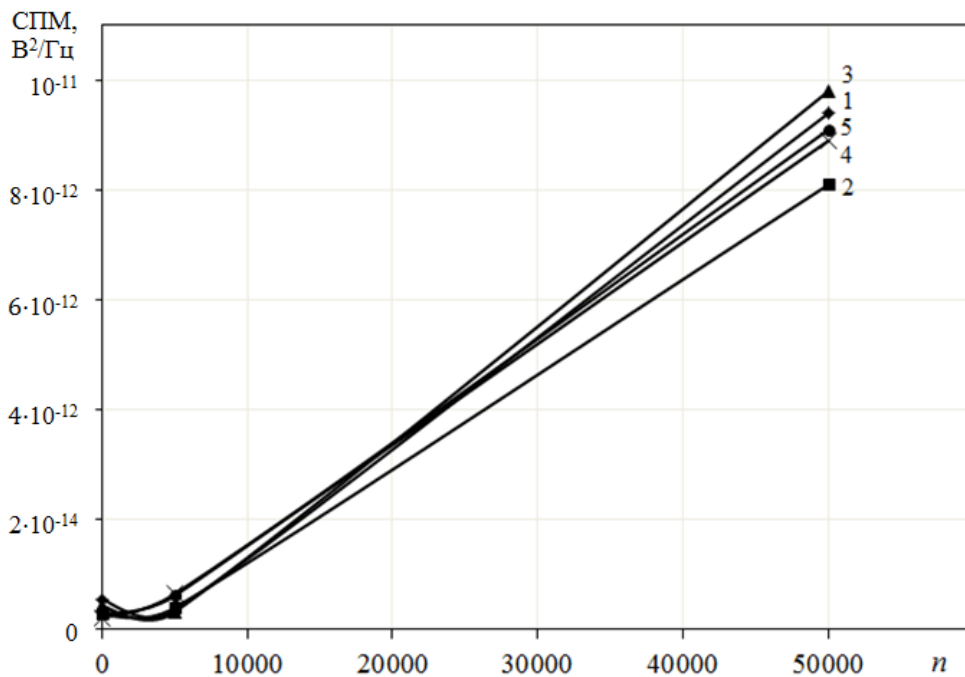


Рисунок 4.17 – Зависимость СПМ НЧ шума электромагнитных реле 6.1-6.5 от числа циклов коммутации на частоте 1 Гц (номер кривой соответствует номеру образца)

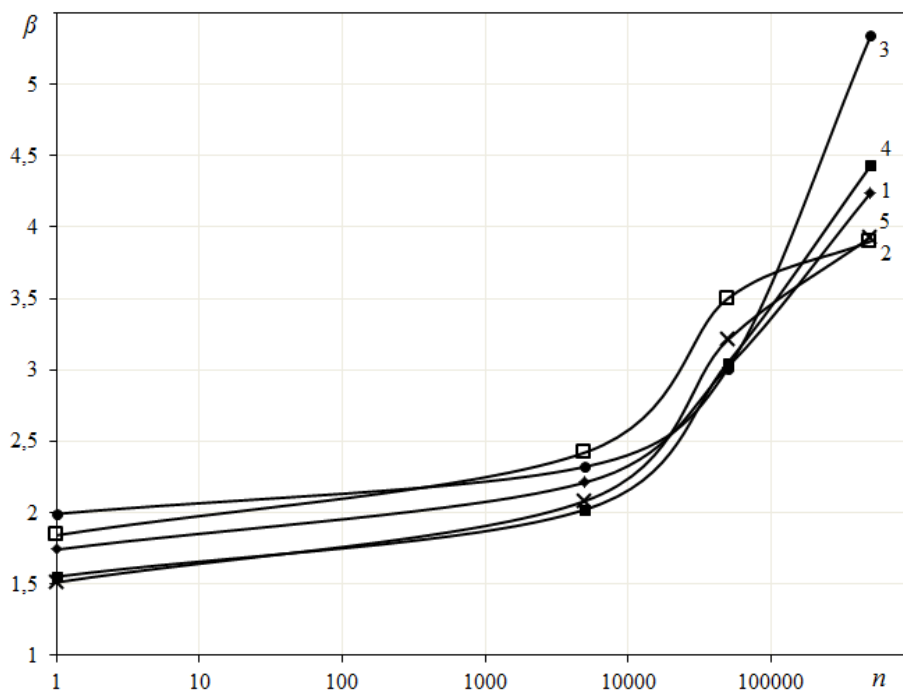


Рисунок 4.18 – Зависимость показателя формы спектра НЧ шума электромагнитных реле 6.1-6.5 от числа циклов коммутации на частоте 1 Гц (номер кривой соответствует номеру образца)

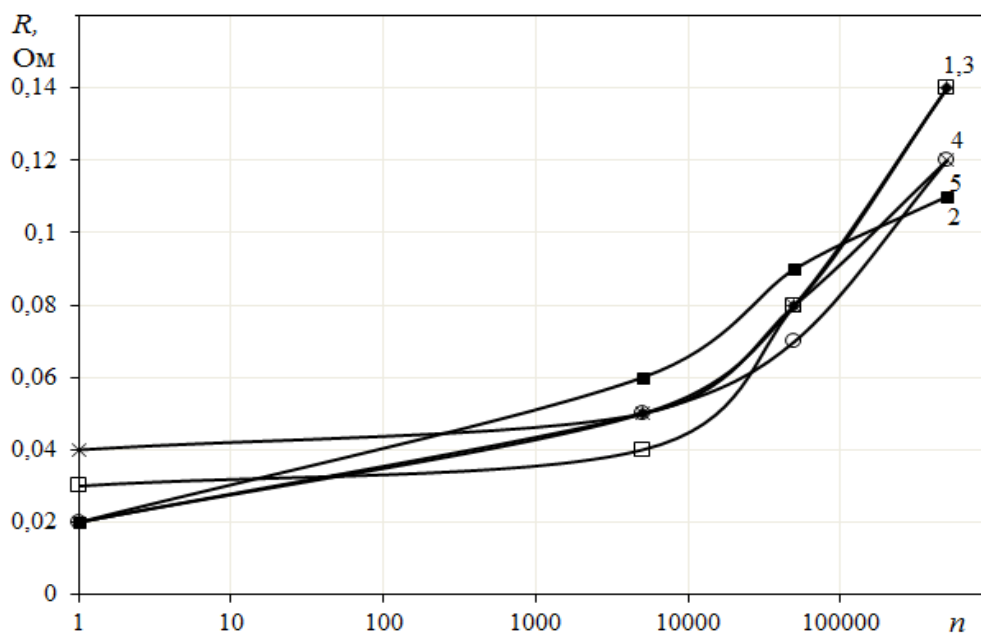


Рисунок 4.19 – Зависимость контактного сопротивления электромагнитных реле 6.1-6.5 от числа циклов коммутации на частоте 1 Гц (номер кривой соответствует номеру образца)

Анализ экспериментальных результатов, приведенных на рисунках 4.17–4.19, показал, что все контролируемые параметры электромагнитных реле синхронно растут с увеличением числа циклов коммутации, особенно при превышении количества циклов искусственного износа реле свыше 10^3 . Анализ результатов показал также, что зависимости параметров НЧ шума и контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле от числа циклов коммутации идентичны.

На рисунке 4.20 приведены зависимости показателя формы спектра β и контактного сопротивления ряда герконов 5-й партии от величины тока коммутации. Повышение значения тока коммутации магнитоуправляемых контактов (более жесткое функциональное воздействие) вызывало рост контактного сопротивления и показателя формы спектра НЧ шума β .

Полученный результат можно объяснить описанным в литературе повышением температуры контакта при смыкании за счет теплового действия дуги и снижением подвижности электронов при рассеянии на фонах.

Следует отметить, что проведение коммутационных испытаний приводило к возникновению контактной эрозии поверхности контактных пластин – образованию пятен различной формы и размеров, которые в специальной литературе называют кратерами [114-115].

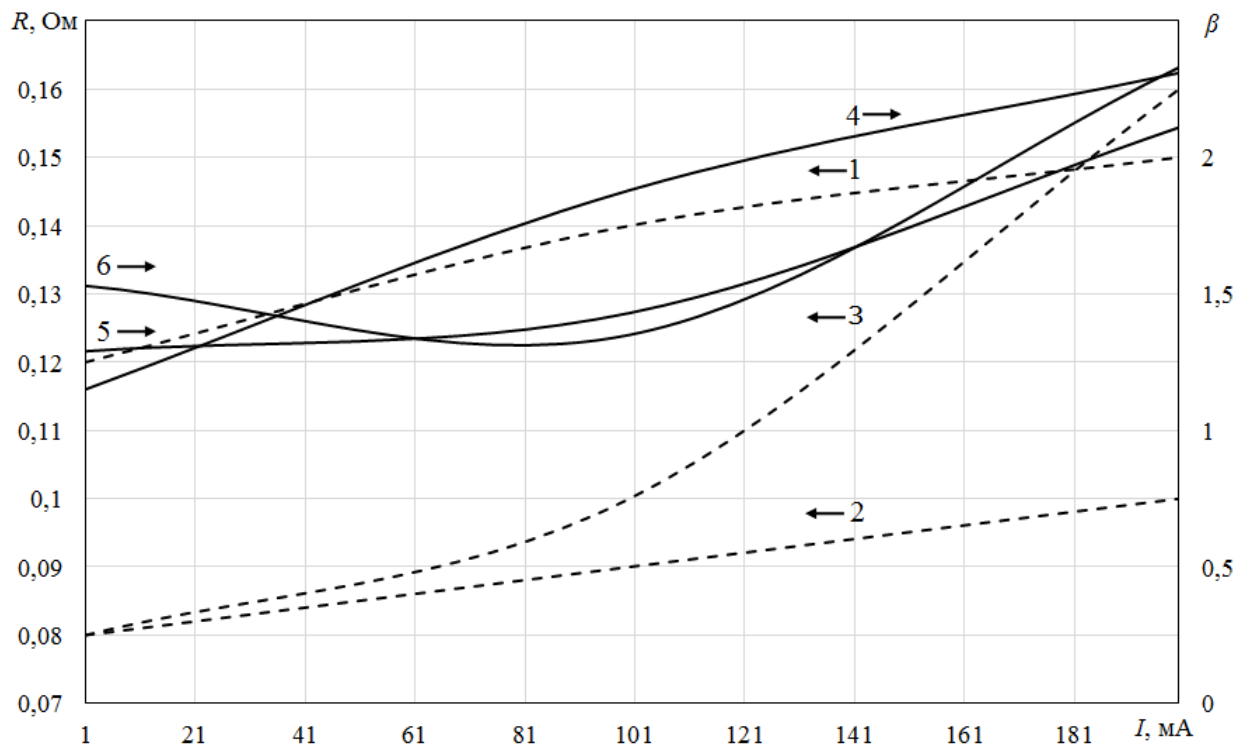


Рисунок 4.20 – Сопоставление зависимостей контактного сопротивления образцов герконов: 1- 5.4; 2-5.5; 3-5.6 и показателя формы спектра β : 4 - 5.4; 5 - 5.5; 6 - 5.6 при изменении величины тока коммутации

Эрозия контактных пластин герконов происходит за счет теплового действия дуги: в контактных опорных микропятнах или точках контактирования, локальные зоны поверхности в стадии размыкания разогреваются до температуры плавления, а в мощных герконах - кипения, что приводит к интенсивному испарению металла. В результате на поверхности образуются кратеры, размеры которых определяются током разряда и теплофизическими свойствами контактного материала.

Физические процессы на поверхности электродов зависят от потока мощности, приходящего на поверхность опорного пятна дуги, их геометрии и материала контактов, способа возбуждения дуги и длительности

ее воздействия на электроды. Поэтому во многих опубликованных работах результаты экспериментальных исследований эрозии электродов и построения методик ее количественной оценки весьма разнообразны. Однако по наблюдениям многих исследователей размыкание контактов при отключении токов в широком диапазоне их значений сопровождается разбрызгиванием капель их материала.

После многократных отключений цепи постоянного тока в результате мостикового переноса на аноде образуется своеобразный кратер, а на катоде — соответствующий ему пик при одинаковых условиях теплоотвода от анода и катода [115, 116].

После коммутационных испытаний на поверхности контактов образовались контактные пятна – наросты и кратеры различной величины, которые имели округлую форму. РЭМ-изображение поверхности некоторых образцов представлено на рисунке 4.21.

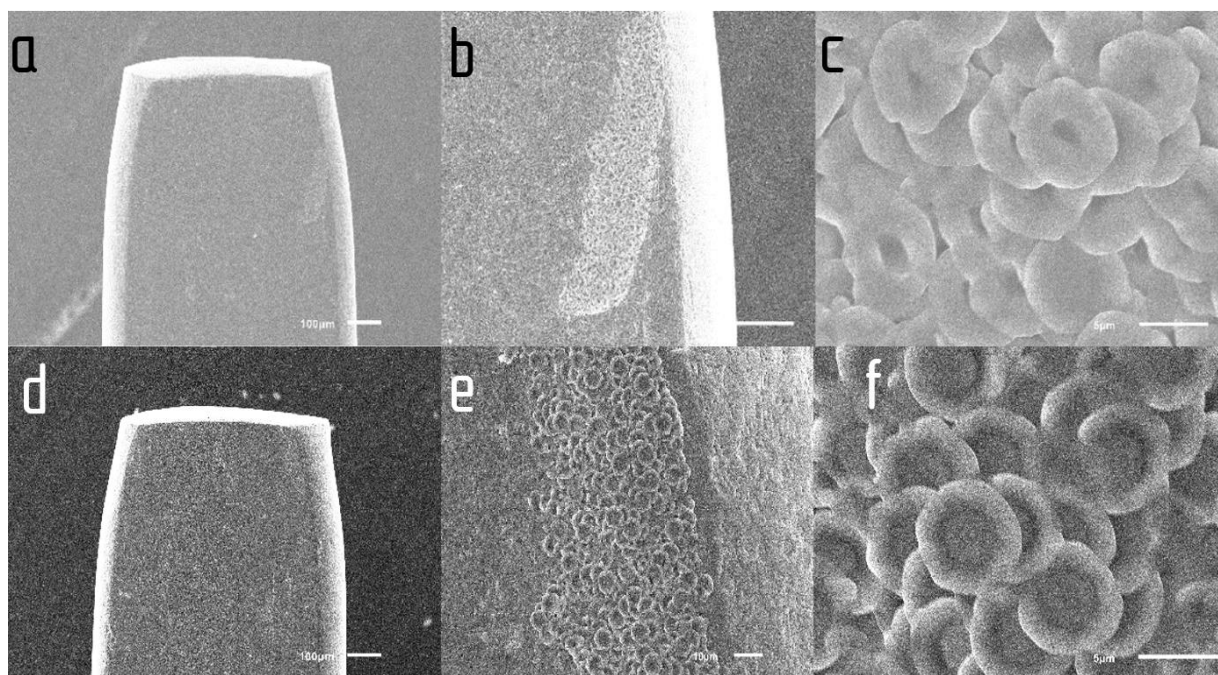


Рисунок 4.21, А – РЭМ-изображения контактов образца 2.1: а, d – общие виды катода и анода соответственно, b, e – катодные артефакты пятен катода и анода соответственно, с, f – кратеры на поверхности контактов [127]

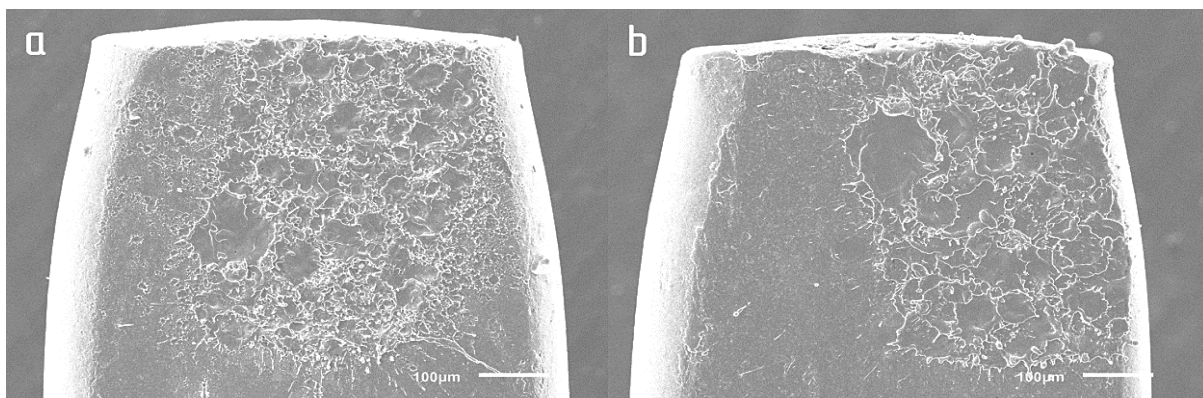


Рисунок 4.21, Б – РЭМ-изображения контактов образца 2.8: а, б – общие виды катода и анода соответственно после 10^5 циклов коммутации при токе 0,3 А

На рисунке 4.21, А видны пятна на пермалловых контактах после многократной коммутации с током 0,1 А. Химический состав контактных пластин представлен спектром РЭМ на рисунке 4.2.

По-видимому, при прохождении больших токов замыкание контакта происходит локально, постепенно оплавливая точку соприкосновения. Судя по точечным дефектам можно предположить, что образуется искра и оплавляет место контакта. На рисунке 4.21, Б приведены РЭМ-изображения контактов с покрытием Au-Ru после многократной коммутации. Изображение свидетельствует о том, что такие контакты оплавливаются сильнее, чем пермалловые, однако зоны оплавления занимают большую площадь поверхности, что меньше влияет на контактное сопротивление.

На основе полученных данных построены зависимости, характеризующие связь коэффициента формы спектров НЧ шума β с площадью пятен и диаметром кратеров. Для образцов с покрытием Au-Ru (образцы 2.1 – 2.5) и без покрытия (образцы 2.6 – 2.10) построены отдельные зависимости.

На рисунке 4.22 представлена зависимость, характеризующая взаимосвязь площади пятна на аноде S_a с коэффициентом формы спектра НЧ шума β . Зависимости, связывающие площади пятна на катоде с коэффициентом β имели аналогичный характер.

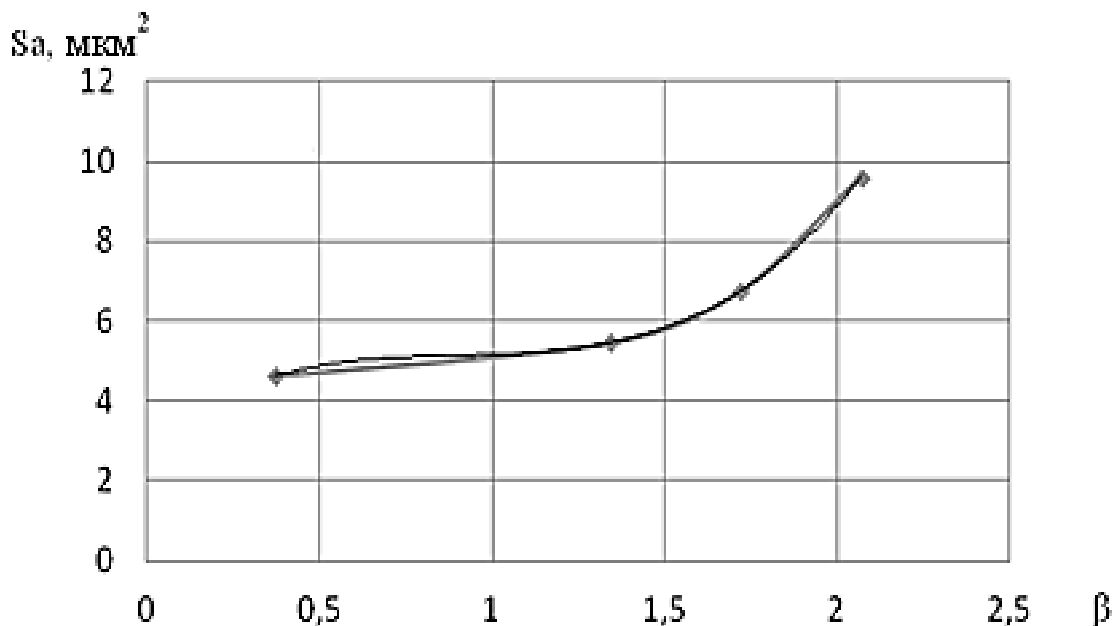


Рисунок 4.22 – Зависимость, характеризующая связь коэффициента формы спектра β с средней площадью контактного пятна на катоде для герконов партии 2 с покрытием Au-Ru после коммутационных испытаний [117]

Анализ данных свидетельствует о том, что разброс площади пятен на аноде для герконов без покрытия шире, чем для герконов с покрытием Au-Ru. Проведение коммутационных испытаний в целом сохраняет общую тенденцию зависимостей.

На рисунке 4.23 представлена зависимость, характеризующая взаимосвязь средних диаметров пятен на аноде d_a с коэффициентом формы спектра НЧ шума β . Зависимости, связывающие средний диаметр пятен на катоде с коэффициентом β имеют аналогичный характер.

На рисунке 4.24 представлены зависимости площади контактных пятен анода и катода образцов 4-й партии после коммутации.

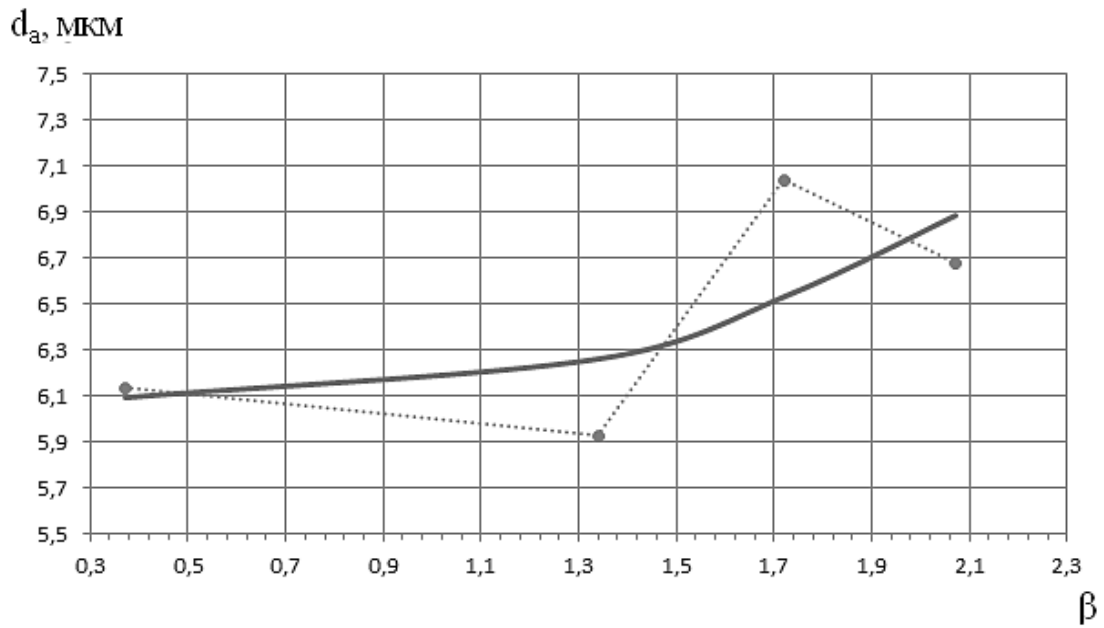


Рисунок 4.23 – Зависимость, характеризующая связь средних диаметров контактных пятен на электродах с показателем формы спектра β после коммутационных испытаний герконов без покрытия Au-Ru [93]

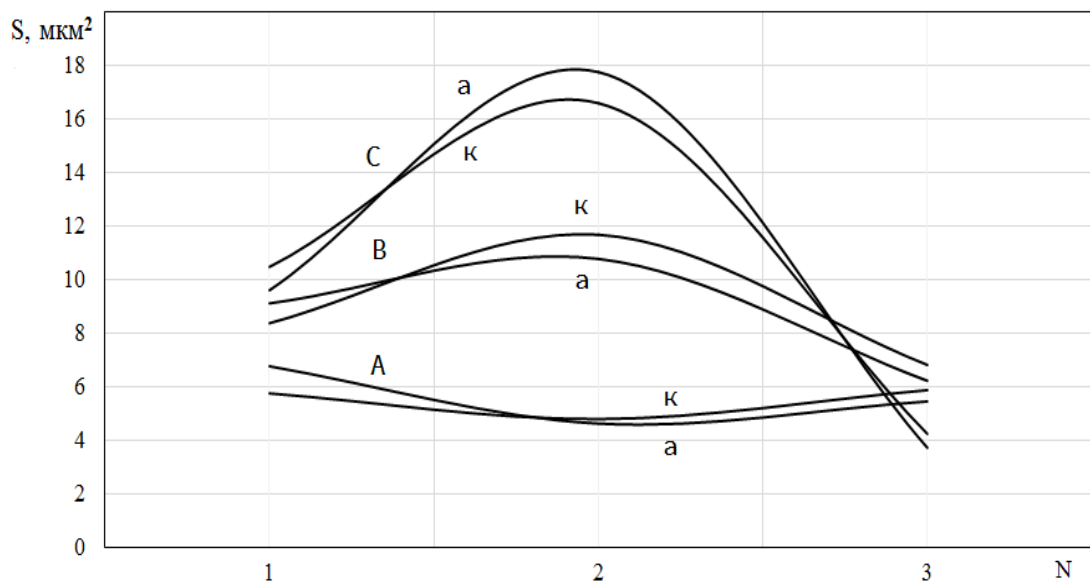


Рисунок 4.24 – Зависимости площади контактных пятен анода и катода (а и к) после коммутации с количеством циклов:

A- $2 \cdot 10^3$; B- $4 \cdot 10^3$; C- 10^4

Из данных, приведенных на рисунках 4.24, 4.25 и 4.26, следует, что площади контактных пятен анода и катода каждого образца практически одинаковы. Кроме того, с ростом количества циклов коммутаций растут площади контактов анода и катода конкретного образца.

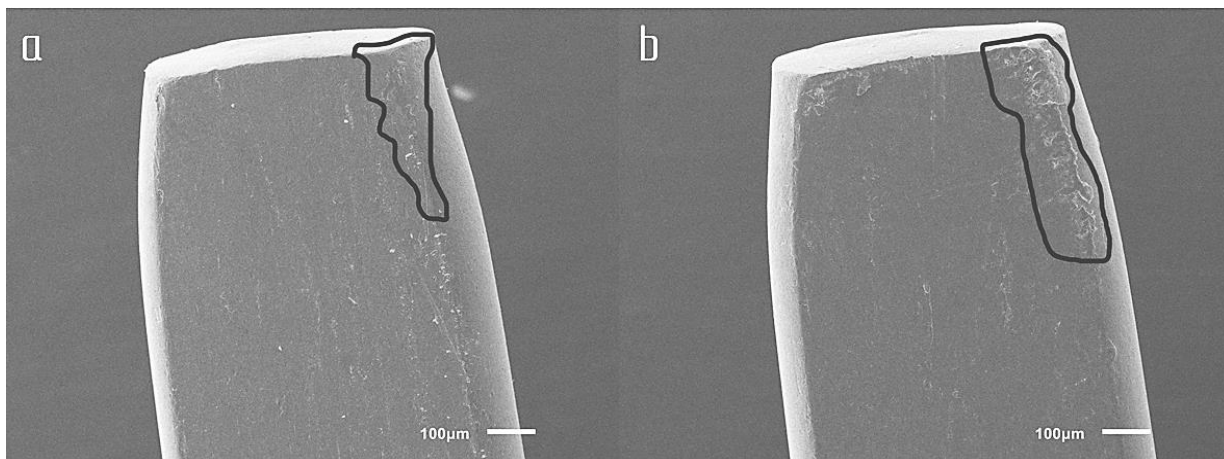


Рисунок 4.25 – РЭМ-изображения катода (а) и анода (б) образца 3.7 после 10000 циклов коммутации при 0,1 А и 20000 коммутаций при 0,2 А на $f=20$ Гц

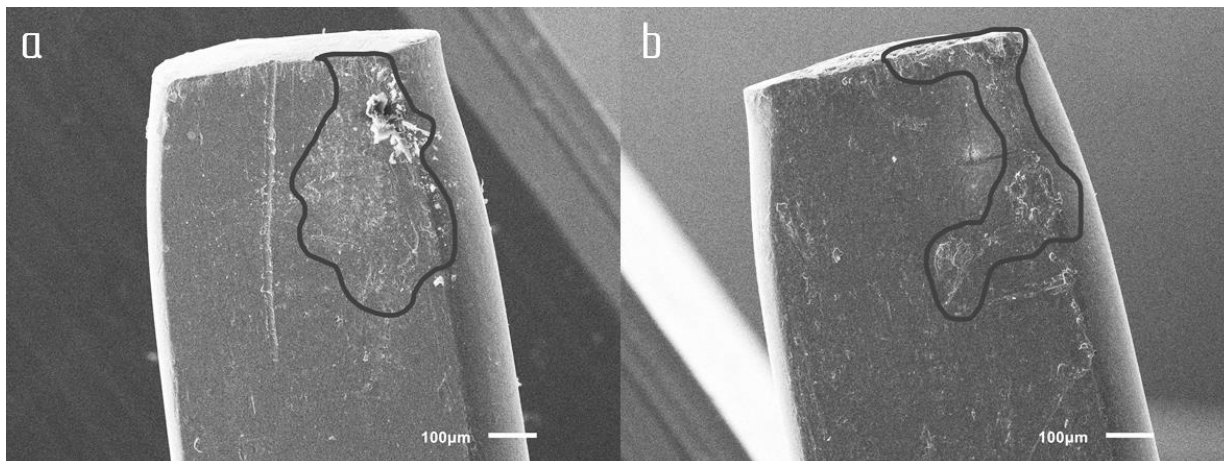


Рисунок 4.26 – РЭМ-изображения катода (а) и анода (б) образца 5.15 после 10000 циклов коммутации при 0,1 А и 20000 коммутаций при 0,2 А на $f=20$ Гц

Площадь соприкосновения анода и катода на поверхности пермаллоевых контактов составляет, как правило, менее 50% общей площади. Результаты проведенных испытаний свидетельствуют о том, что

из-за меньшей площади соприкосновения сопротивление контактов под нагрузкой становится выше.

Согласно работе [13], чем большие механические напряжения имеют проводящие пленки, тем большее значение коэффициента формы спектра β для них характерно. При сравнении зависимостей, характеризующих связь средних диаметров кратеров на электродах, с коэффициентом формы спектра НЧ шума β для герконов с покрытием Au-Ru и без покрытия обнаружено, что для образцов герконов с покрытием Au-Ru характерен больший разброс значений коэффициента β , что объясняется, по-видимому, большим разбросом внутренних механических напряжений внутри материала. Однако разброс средних диаметров кратеров почти не различался для образцов с покрытием Au-Ru и без покрытия.

На основе полученных данных можно предположить, что герконы с покрытием Au-Ru имеют более высокую надежность и стабильные рабочие характеристики.

Анализ экспериментальных результатов, приведенных в таблице 4.3, а также на рисунках 4.12-4.16 и 4.24, свидетельствуют о том, 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 .

Многократная коммутация электромагнитных реле, как показали экспериментальные результаты, приведенные в таблице 4.4 и на рисунках 4.17- 4.19, привела к росту до 3-6 раз контактного сопротивления, СПМ НЧ шума на 4-5 порядка, показателя формы спектра в 2-2,5 раза при увеличении числа циклов коммутации реле, особенно при их превышении значения 10^3 - 10^4 . Таким образом, результаты коммутационных испытаний низкоомных контактных групп обоих типов, проведенные в соответствии с разработанной методикой, идентичны.

Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод, что природа возникновения НЧ шума и особенности спектральных характеристик связаны с флуктуациями подвижности и, отчасти, концентрации электронов в проводящих покрытиях электродов герконов и реле, проявление которых коррелирует с особенностями структуры (возникновением больших механических напряжений) на поверхности образцов в соответствии с вакансионной моделью Г.П. Жигальского [1, 16, 23]. По-видимому, определенную роль играет и повышение температуры вследствие образования дуги при замыкании – размыкании контакта.

4.4 Исследование влияния восстановительной технологической обработки на характеристики НЧ шума магнитоуправляемых контактов

В работах [118, 119] представлены результаты сравнительных испытаний герконов МКА-14103 и МКА-14108, обработанных низко- и высоковольтными импульсными разрядами с целью исследования возможности изготовления герконов с модифицированной пермаллоевой контактной поверхностью (вместо гальванопокрытия из драгметаллов).

Указано, что одной из основных причин деградации пермалловых контактных пластин является образование на их поверхности углеводородных загрязнений, превращающихся в процессе коммутации в диэлектрическое полимерное покрытие. В то же время у контактов герконов с покрытиями Au-Ru в процессе коммутаций полимерные покрытия не образуются.

Авторы утверждают, что стабильность контактного сопротивления при коммутациях герконов со специальными покрытиями связана с экранировкой углеводородных загрязнений подложки покрытием Au-Ru.

Коммутационные испытания серийно выпускаемых герконов МКА-14103 и опытных образцов герконов МКА-14108 показали, что наработка опытных герконов, предварительно обработанных

высоковольтными импульсными разрядами, соответствует требованиям, предъявляемым к долговечности серийных приборов [118]. Таким образом, идея решения проблемы коррозионной и эрозионной устойчивости без применения покрытий из благородных металлов нашла свое экспериментальное подтверждение, в том числе, по-видимому, в качестве восстановительной операции.

Не исключено, что подобная восстановительная технологическая обработка, снижающая величину контактного сопротивления, применима и к магнитоуправляемым контактам с покрытиями Au-Ru.

В разделе 4.3 нами представлены результаты изучения влияния многократной коммутации магнитоуправляемых контактов в качестве имитации естественного износа с целью выявления потенциальной опасности отказа компонента. Установлено, что многократная коммутация магнитоуправляемых контактов привела к деградации, как контактного сопротивления герконов, так и характеристик спектров НЧ шума.

Задачей настоящего раздела явилось изучение влияния восстановительной технологической обработки на параметры партии магнитоуправляемых контактов, забракованных по повышенному контактному сопротивлению.

Экспериментальное изучение характеристик магнитоуправляемых контактов проводилось в следующей последовательности:

- измерение спектров НЧ шума исходных образцов герконов, забракованных по повышенному контактному сопротивлению, и обработка полученных результатов;
- восстановительная технологическая обработка образцов 4-й партии;
- измерение контактного сопротивления и спектров НЧ шума восстановленных образцов герконов, забракованных по повышенному контактному сопротивлению, и обработка полученных результатов;
- искусственный износ восстановленных контактов путем многократной коммутации при различных режимах работы;

- измерение контактного сопротивления и спектров НЧ шума восстановленных искусственно изношенных магнитоуправляемых контактов, обработка результатов;

- исследование материала контактов при помощи растровой электронной микроскопии;

- анализ полученных результатов.

В таблице 4.5 представлены параметры спектров НЧ шума и номиналы сопротивления магнитоуправляемых контактов до и после восстановительной технологической обработки

Таблица 4.5 – Параметры спектров НЧ шума и номиналы сопротивления магнитоуправляемых контактов 4-й партии до и после восстановительной технологической обработки

№	До обработки			После обработки		
	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$	СПМ, $\text{В}^2/\text{Гц}$	β	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$	СПМ, $\text{В}^2/\text{Гц}$	β
1	0,277	$8,7 \cdot 10^{-7}$	1,37	0,09	$1,5 \cdot 10^{-9}$	1,68
2	0,339	$4,2 \cdot 10^{-7}$	1,50	0,11	$0,5 \cdot 10^{-9}$	1,34
3	0,624	$7,1 \cdot 10^{-7}$	1,41	0,07	$1,3 \cdot 10^{-10}$	1,36

В таблице 4.5 указана спектральная плотность мощности НЧ шума образцов, измеренная на частоте 0,1 Гц. На рисунках 4.27 - 4.29 в качестве примеров представлены исходные спектры НЧ шума образцов 4.4, 4.5 и 4.6, а также после их восстановительной обработки на предприятии. Видим, что восстановительная обработка привела к снижению СПМ НЧ шума на 2-3 порядка на частоте 0,01 Гц.

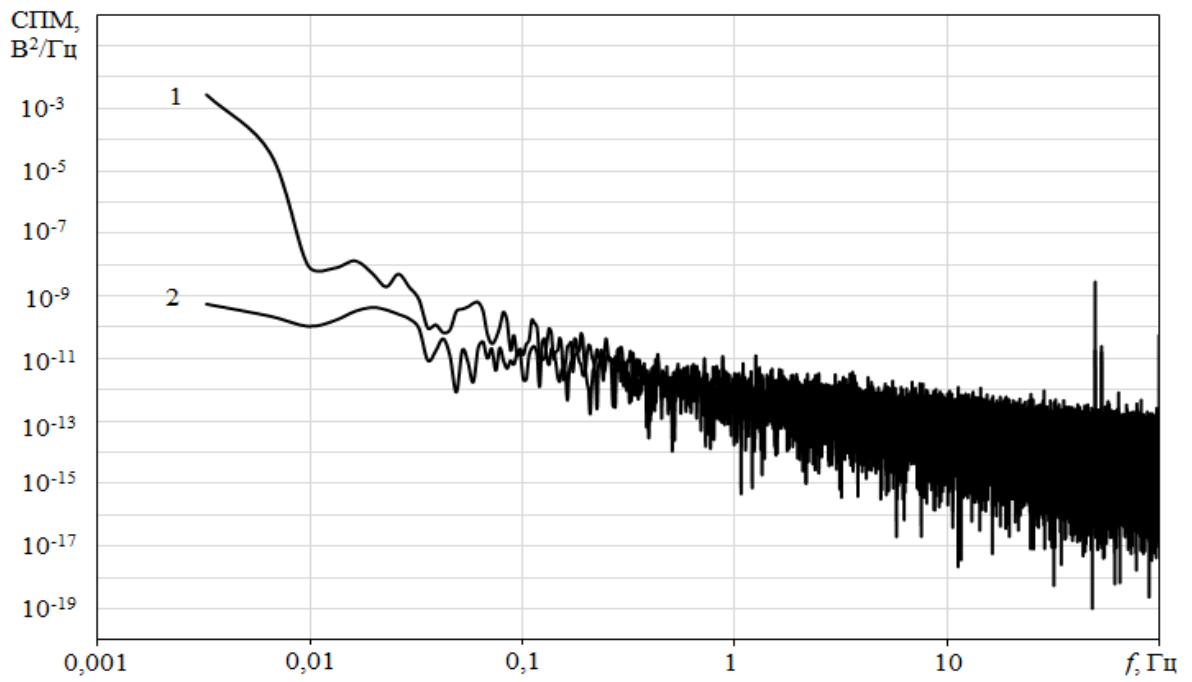


Рисунок 4.27 – Спектры НЧ шума образца 4.4: 1 – до; 2 – после восстановительной обработки

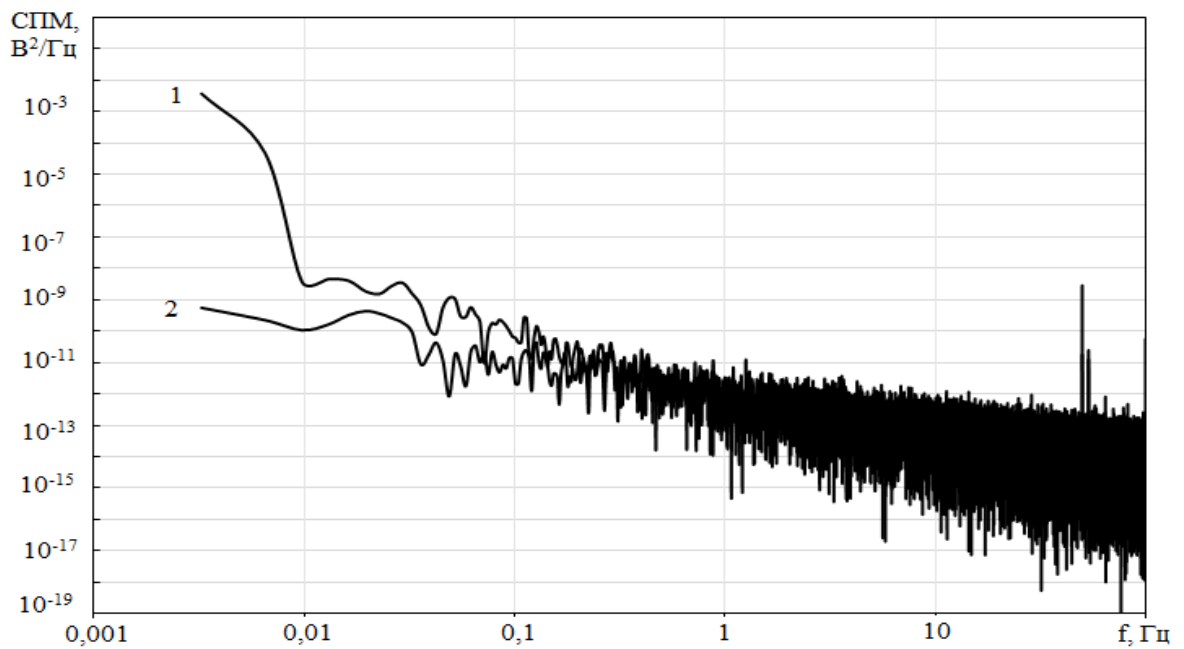


Рисунок 4.28 – Спектры НЧ шума образца 4.5: 1 – до; 2 – после восстановительной обработки

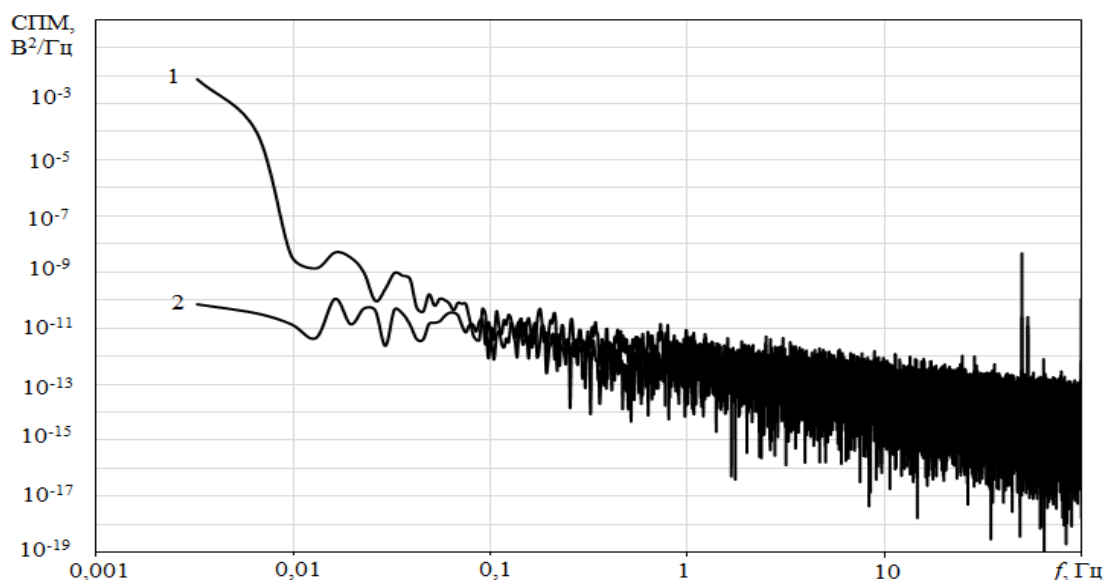


Рисунок 4.29 – Спектры НЧ шума образца 4.6: 1 – до; 2 – после восстановительной обработки

Восстановленные образцы были подвергнуты коммутационным испытаниям. Количество замыканий, которым подвергались герконы при проведении коммутационных испытаний, составило от 10^3 до 10^6 при величине тока 0,2 А и частоте коммутации 90 Гц. В таблице 4.6 представлены результаты коммутационных испытаний, которым подвергались герконы 4-й партии.

Таблица 4.6 – Режимы и результаты коммутационных испытаний образцов 4-й партии

№ Геркона	Коэф. в	Частота перегиба, Гц	Угол между линиями аппроксимации, Град.	Ток при испытании, А	Кол-во срабатываний	Частота коммутаций, Гц	Сопротивление геркона до/после испытаний, Ом
Измерение параметров без коммутационных испытаний							
1	1,68	1,29	46,5	0	0	0	0,09
2	1,47	1,34	43,5	0	0	0	0,11
3	1,66	1,36	46,0	0	0	0	0,07
Коммутация 1000 раз при токе 0,2 А при частоте коммутации 90 Гц							
1	2,04	1,10	49,1	0,2	1000	90	0,09/0,09
2	2,38	1,01	54,2	0,2	1000	90	0,11/0,11
3	2,35	1,15	54,5	0,2	1000	90	0,07/0,07

Продолжение таблицы 4.6

Коммутация 10000 раз при токе 0,2 А при частоте коммутации 90 Гц							
1	2,73	0,87	56,8	0,2	10000	90	0,09/0,14
2	2,75	1,06	60,0	0,2	10000	90	0,11/0,15
3	2,72	0,96	57,1	0,2	10000	90	0,07/0,15
Коммутация 100000 раз при токе 0,2 А при частоте коммутации 90 Гц							
1	3,64	0,91	61,2	0,2	100000	90	0,14/0,37
2	3,73	0,85	62,2	0,2	100000	90	0,15/0,24
3	3,89	0,78	64,1	0,2	100000	90	0,15/0,31
Коммутация 1000000 раз при токе 0,2 А при частоте коммутации 90 Гц							
1	отказ	∞	∞	0,2	1000000	90	∞
2	отказ	∞	∞	0,2	1000000	90	∞
3	отказ	∞	∞	0,2	1000000	90	∞

Результаты свидетельствуют о росте СПМ НЧ шума и показателя формы спектра при увеличении числа циклов коммутации. Изменение спектральной плотности мощности шума представлено в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Значения СПМ НЧ шума на частотах 0,01 Гц и 0,1 Гц после коммутационных испытаний образцов 4-й партии с частотой коммутации 90 Гц

№	Исходные		10 ³ коммутаций		10 ⁴ коммутаций		10 ⁵ коммутаций	
	S _{0,01}	S _{0,1}	S _{0,01}	S _{0,1}	S _{0,01}	S _{0,1}	S _{0,01}	S _{0,1}
1	1,58·10 ⁻⁸	1,73·10 ⁻¹⁰	9,62·10 ⁻⁸	7,28·10 ⁻¹⁰	8,81·10 ⁻⁷	2,27·10 ⁻⁹	6·10 ⁻⁵	1,59·10 ⁻⁹
2	3,58·10 ⁻⁹	1,5·10 ⁻¹⁰	8·10 ⁻⁷	3,2·10 ⁻¹⁰	9·10 ⁻⁷	9,45·10 ⁻¹¹	10 ⁻⁴	2,97·10 ⁻⁹
3	1,14·10 ⁻⁹	1,25·10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁴	1,48·10 ⁻¹⁰	9·10 ⁻⁷	4,29·10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁴	5,9·10 ⁻¹⁰

Анализ таблицы показывает, что СПМ НЧ шума восстановленных герконов 4-й партии после коммутационных испытаний возрастает до 5 порядков величины на частоте 0,01 Гц и в 4-5 раз на частоте 0,1 Гц при числе циклов свыше 10⁴, ранее таких результатов не наблюдалось. После коммутационных испытаний герконов с кондиционным R_п наблюдался рост СПМ НЧ шума в 2,5-3 раза (раздел 4.3).

На рисунках 4.30 - 4.32 представлены спектры НЧ шума образцов 4.1, 4.2 и 4.3 после их восстановительной обработки и коммутационных испытаний с разным количеством циклов.

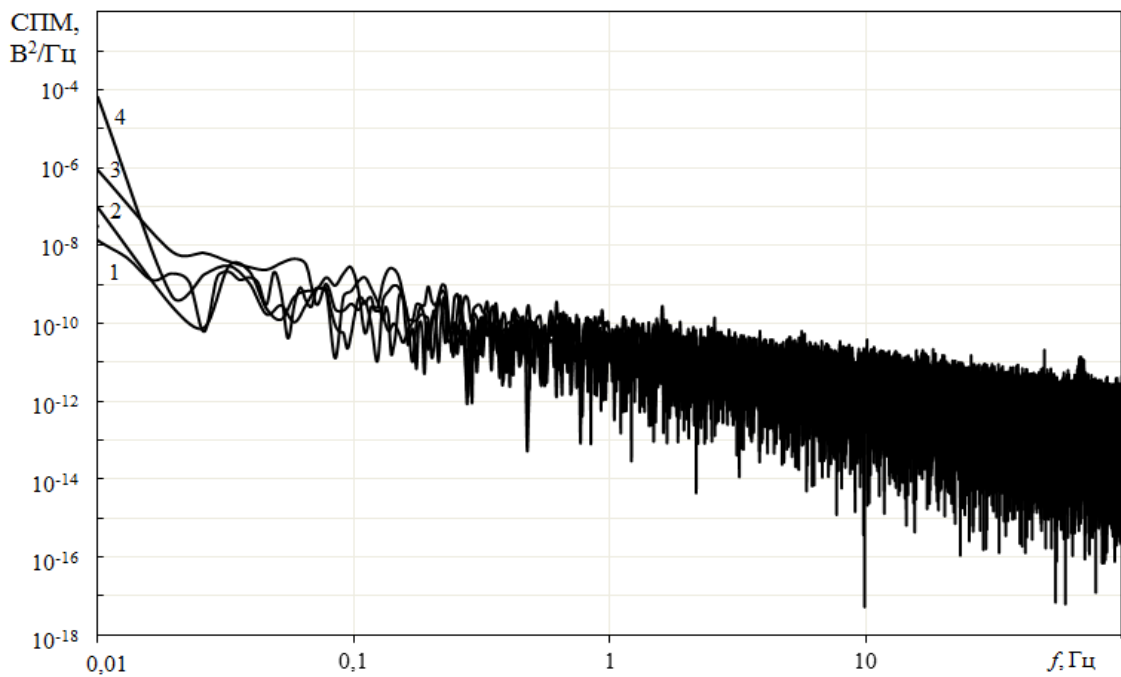


Рисунок 4.30 – Спектры НЧ шума: 1 – исходного восстановленного магнитоуправляемого контакта (образец 4.1); 2 - после 10^3 ; 3 - 10^4 , 4 - 10^5 циклов коммутации при величине тока 0,2 А

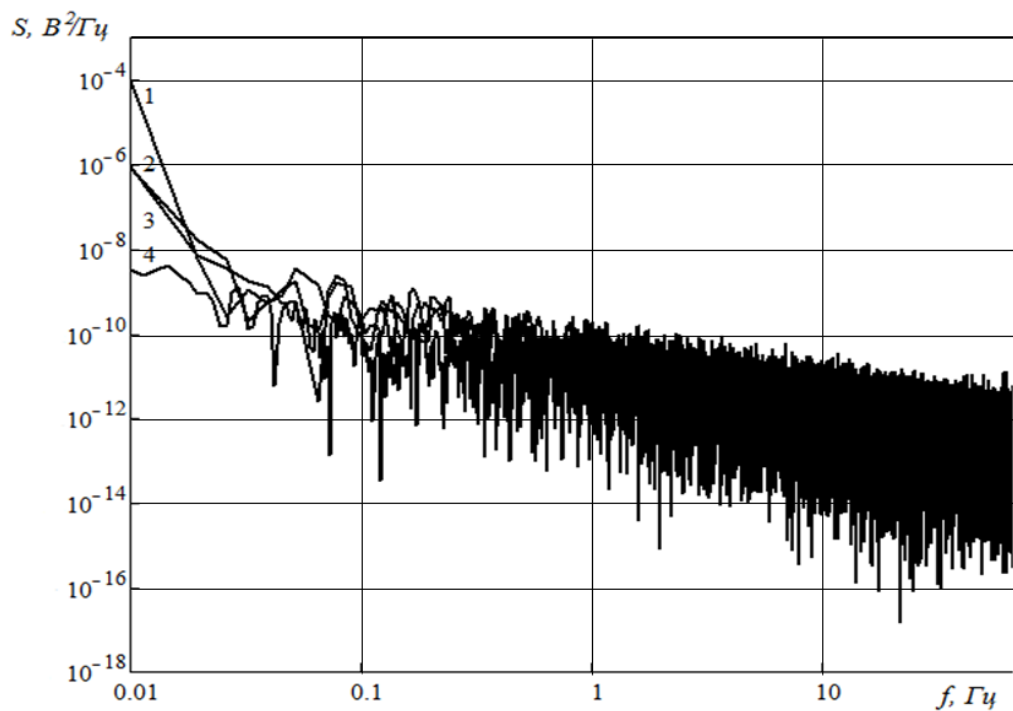


Рисунок 4.31 – Спектры НЧ шума: 1 – исходного восстановленного магнитоуправляемого контакта (образец 4.2); 2 - после 10^3 ; 3 - 10^5 циклов коммутации при величине тока 0,2 А

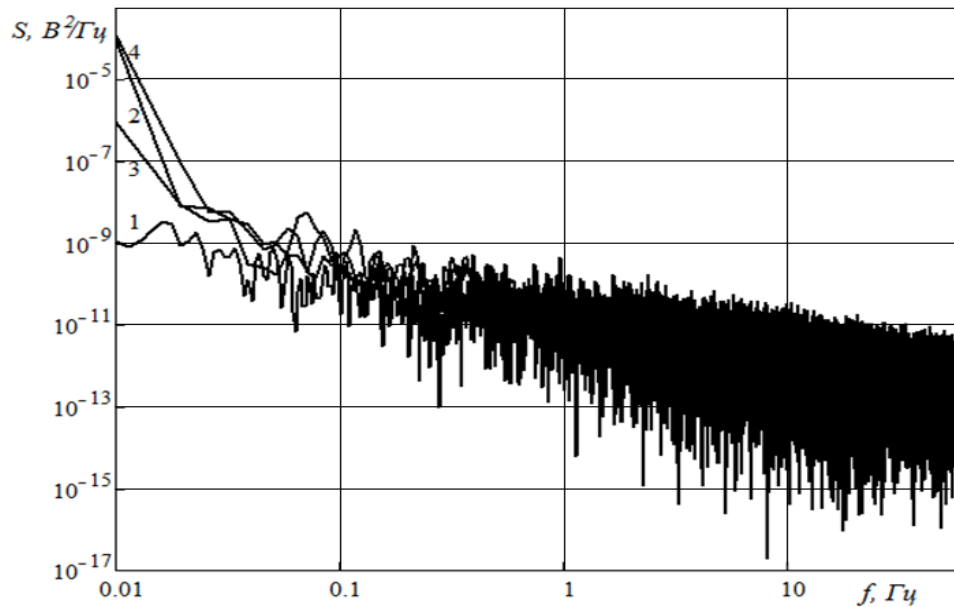


Рисунок 4.32– Спектры НЧ шума: 1 – исходного восстановленного магнитоуправляемого контакта (образец 4.3); 2 - после 10^3 ; 3 - 10^4 , 4 - 10^5 циклов коммутации при величине тока 0,2 А

На рисунке 4.33 представлена зависимость коэффициента формы спектра НЧ шума восстановленных магнитоуправляемых контактов от числа циклов коммутации.

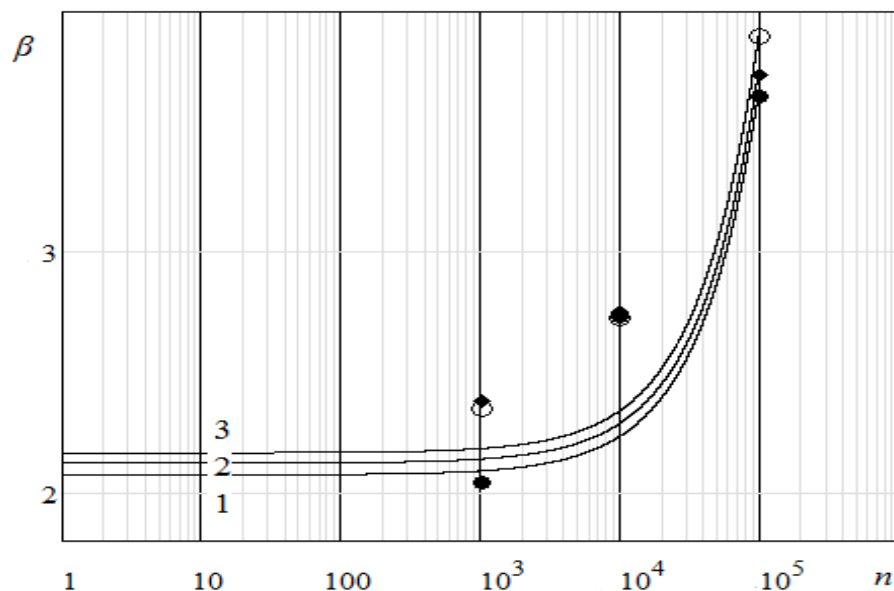


Рисунок 4.33- Зависимость показателя формы спектра β образцов 1- 4.1; 2-4.2; 3-4.3 от числа циклов искусственного износа магнитоуправляемых контактов n (0,2 А, 90 Гц)

На рисунке 4.34 представлена зависимость величины контактного сопротивления, а на рисунке 4.35 – приращения $R_{\text{п}}$ восстановленных магнитоуправляемых контактов от числа циклов коммутации.

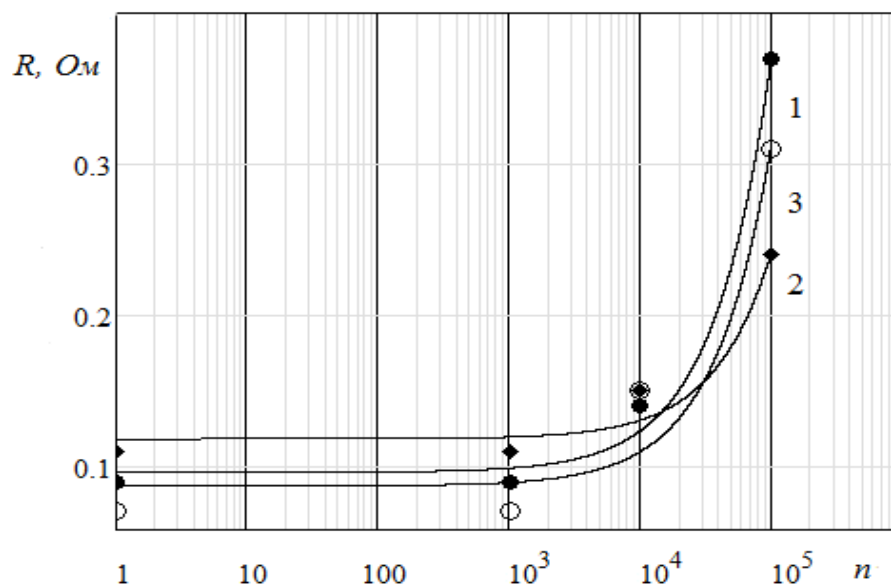


Рисунок 4.34- Зависимость сопротивления герконов 1- 4.1; 2 - 4.2; 3 - 4.3 от числа циклов искусственного износа магнитоуправляемых контактов n (0,2 А, 90 Гц)

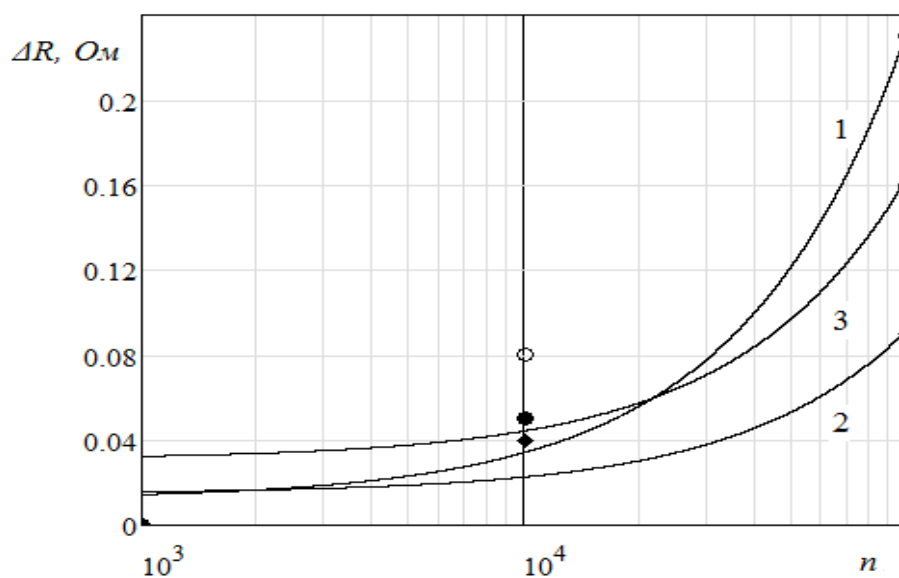


Рисунок 4.35 - Зависимость изменения сопротивления герконов образцов 1- 4.1; 2 - 4.2; 3 - 4.3 от числа циклов искусственного износа магнитоуправляемых контактов n (0,2 А, 90 Гц)

Столь значительного, в 1,5-2 раза роста величины β после проведения коммутационных испытаний ранее не наблюдали. Сравнение с результатами, приведенными на рисунке 4.14, показало, что для герконов с кондиционными параметрами при числе коммутаций 10^3 - 10^5 рост показателя формы спектра β образцов был значительно ниже и составлял 20-80% от исходного значения при числе коммутаций 10^3 - 10^5 (раздел 4.3).

Как видим, контактное сопротивление герконов и его приращение резко увеличиваются (в 2,5-4 раза), что также не характерно для герконов с кондиционным контактным сопротивлением, которое увеличивалось до 20-80% от исходного значения при росте числа циклов коммутации свыше 10^3 - 10^4 (раздел 4.3).

Структура поверхности контактных пластин до и после коммутации исследована при помощи РЭМ. На рисунках 4.36 и 4.37 изображены поверхности контактов герконов 4-й партии с покрытием Au-Ru.

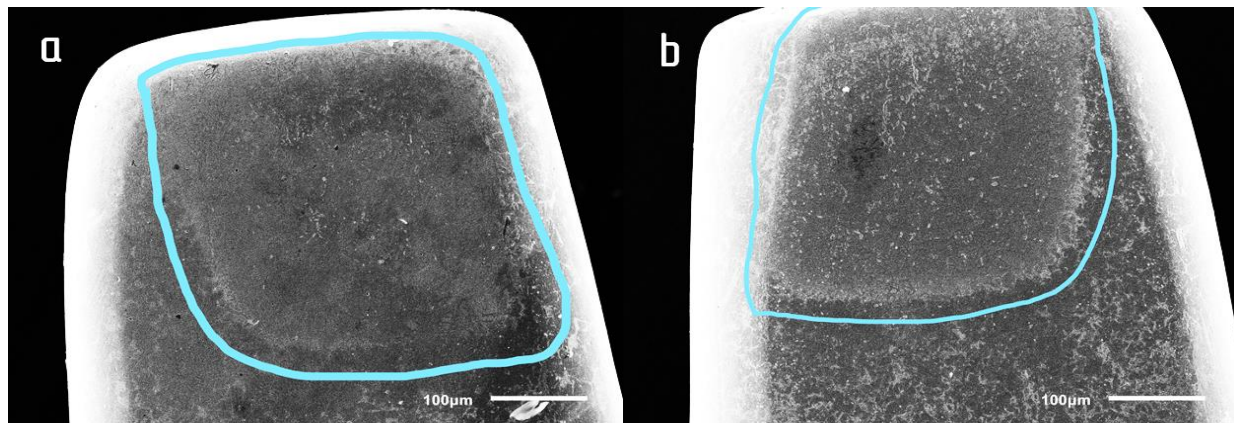


Рисунок 4.36 - РЭМ-изображения катода (а) и анода (б) образца 4.1 после восстановительной обработки. Проведено 10^4 циклов коммутации на $f=50$ Гц

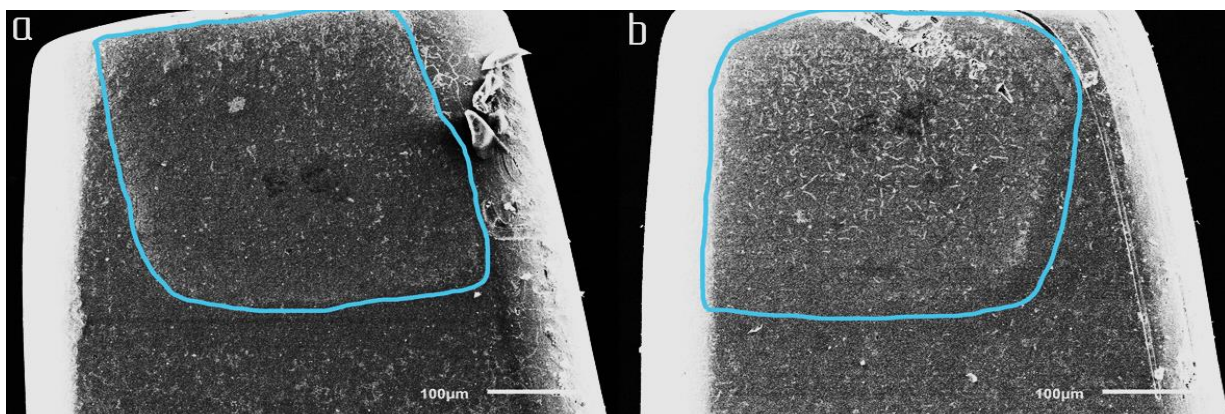


Рисунок 4.37 - РЭМ-изображения катода (а) и анода (б) образца 4.3 после восстановительной обработки. Проведено 10^4 циклов коммутации на $f=50$ Гц

Химический состав покрытия представлен спектром РЭМ на рисунке 4.1.

Как и ранее, площади контактных пятен катода и анода практически совпадают. Площадь соприкосновения анода и катода на поверхности контактов, покрытых слоем Au-Ru, составляет, как правило, более 50% общей площади в отличие от пермалловых контактных пластин. Кроме того, поверхность контактов с покрытием Au-Ru является визуально более однородной. Таким образом, при покрытии благородными металлами сопротивление контактов становится ниже. Это следует из результатов исследований, представленных в разделе 4.

Таким образом, восстановительная технологическая обработка магнитоуправляемых контактов, забракованных по повышенному сопротивлению, привела к снижению контактного сопротивления до кондиционных величин, СПМ НЧ шума и коэффициента формы спектра β . Однако 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 $R_{\text{п}}$, что может свидетельствовать о потенциальной возможности отказа восстановленных компонентов.

Выводы

Впервые при помощи разработанных измерительно-аналитического комплекса и программного обеспечения проведены экспериментальные исследования контактного сопротивления и характеристик спектров НЧ шума объемных низкоомных объектов – магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле.

В качестве функционального воздействия, имитирующего естественный износ коммутационных устройств, применена многократная коммутация с количеством циклов 10^3 - 10^6 с предшествующим и последующим изучением параметров спектров НЧ шума с целью возможного прогнозирования ресурса работы компонентов.

Подтверждены предположения о возможной природе возникновения и особенностях спектральных характеристик НЧ шума объемных проводниковых объектов на основе представлений о флуктуациях подвижности и, отчасти, концентрации электронов в проводящих покрытиях электродов герконов, проявление которых коррелирует с особенностями структуры образцов. Доказательством может служить взаимосвязь контактного сопротивления, СПМ, показателя формы спектра НЧ шума, которые изменяются синхронно.

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, 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 .

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 контактных

групп обоих типов, проведенные в соответствии с разработанной методикой, идентичны.

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 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 $R_{\text{п}}$. Особенно значительным оказался рост СПМ НЧ шума: до 5 порядков величины на частоте 0,01 Гц и в 4-5 раз на частоте 0,1 Гц. Таким образом, спектральная плотность мощности НЧ шума является характеристикой, наиболее чувствительной к возможному отказу компонента.

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 $R_{п}$. 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.

Библиографический список

1. Жигальский Г.П. Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2012. 512 с.
2. Букингом М. Шумы в электронных приборах и схемах. /Пер. с англ. Мир, 1986. 398 с.
3. Ван-дер-Зил А. Шум. Источники, описание, измерение. М.: Сов.радио, 1973. 229 с.
4. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа. 1977. 448 с.
5. Литвинов В.Г. Локальная диагностика электрофизических свойств полупроводниковых микро- и наноструктур: дис. д.ф.-м..н.: 01.04.10 / Литвинов Владимир Георгиевич. Рязань, 2020. 332 с.
6. Жигальский Г.П., Холомина Т.А. Избыточные шумы и глубокие уровни в детекторах ядерных частиц и ионизирующего излучения на основе GaAs // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 6. С. 553–581.
7. Кострюков С.А. Влияние электрического поля на процессы формирования низкочастотного шума в барьерах Шоттки: дис. к-та физ.-мат. наук: 01.04.10 / Кострюков Сергей Анатольевич. Рязань, 2007. 133 с.
8. Соколик С.А., Гуляев А.М., Мирошникова И.Н. Совершенствование установки для исследования низкочастотного шума полупроводниковых приборов и структур // Измерительная техника. 1997. №1. С. 61-65.
9. Ключев А.В. Флуктуационные эффекты в полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами и физических системах с правилами льда: дис. д.ф.-м..н.: 01.04.03/ Ключев Алексей Викторович. Нижний Новгород, 2021. 280 с.
10. Разуменко Д. Низкочастотные шумы электронных компонентов как инструмент для диагностики внутренних дефектов // Компоненты и технологии. 2008. № 9. С.168–176.

11. Гупта М.С. Тепловой шум в нелинейных резистивных приборах и его эквивалентное схемное представление // ТИИЭР. 1982. Т. 70. Вып. 8. С. 5-25.
12. Коган Ш. М. Низкочастотный токовый шум со спектром $1/f$ в твердых телах / Ш. М. Коган // УФН. 1985. Т. 145. С. С.285-328.
13. Жигальский Г.П. Шумы вида $1/f$ и нелинейные эффекты в тонких металлических плёнках //УФН. 1997. Т. 167. № 6. С. 623-647.
14. Hooge F.N. $1/f$ noise is no surface effect //Phys. Lett. A. 1969. Vol. 29. P. 139-140.
15. Якубович Б. И. О природе избыточного низкочастотного шума (обзор) // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 127-138. URL: <https://advance.orion-ir.ru/UPF-16/2/UPF-4-2-127.pdf>
16. Якубович Б. И. Физические основы флуктуационного неразрушающего контроля твердых материалов и электронных приборов // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 5-10. URL: <https://applphys.orion-ir.ru/appl-16/16-1/PF-16-1-5.pdf>
17. Куликов Е.И. Методы измерения случайных процессов. М.:Радио и связь. 1986. 272 с.
18. Кострюков С.А., Холомина Т.А. Особенности анализа сигналов низкочастотного шума методом дискретного преобразования Фурье. //Измерительная техника. 2005. № 12. С. 47-50.
19. Кострюков С.А., Холомина Т.А. Программное обеспечение НЧ шумовой спектроскопии глубоких уровней. //Известия вузов. Электроника. 2006. №4 С. 36-43.
20. Жигальский Г.П. Неравновесный $1/f^{\nu}$ - шум в проводящих пленках и контактах //УФН. 2003. Т. 173. № 5. С. 465-490.
21. Вейвлет- и фурье- анализ электрических флуктуаций в полупроводниковых и электрохимических системах./ Е.Ю. Будников, И.Ю. Кукоев, А.В. Максимычев, И.Н. Мирошникова, С.Ф. Тимашев, А.М. Гуляев. //Измерительная техника, 1999. N11. С. 40-44.

22. Кукоев И. Ю. Вейвлет-анализ шумовых процессов в полупроводниковых структурах: дис. к-та техн. наук: 01.04.10; 05.27.01. Москва, МЭИ. 2005. 191 с.

23. Сирая Т. Н. Статическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств. // Гироскопия и навигация. Том 28. №1. 2020. С. 3–18.

24. Тимашев С. Ф.; Поляков, Ю. С.; Лакеев, С. Г.; Мисуркин, П. И.; Данилов, А. И. Принципы флуктуационной метрологии // Журнал физической химии. 2010. Т. 84, N 10. С. 1980-2000.

25. Метод и схема измерения сверхмалых значений низкочастотного фликкер-шума ИОН <https://www.compel.ru/lib/135000> (дата обращения 20.10.22).

26. Simple, effective method and circuit to measure very-low 1/f voltage reference noise (<1MV, 0.1Hz to 10Hz) <https://www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2020/01/ishodnik.pdf> (дата обращения 21.11.22).

27. Кострюков С.А. Автоматизированная установка для измерения СПМ низкочастотных шумов. //Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы междунар. науч.-методич. семинара. – М.:МНТРОЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 2003. С. 23-25.

28. Кострюков С.А. Установка шумовой спектроскопии глубоких уровней. //Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды VII международной конференции. Ульяновск: УлГУ, 2005. С. 68-69.

29. Кострюков С.А. Вычисление спектральной плотности мощности низкочастотных шумов. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 5740. Дата регистрации: 21.02.2006.

30. MT-047. Op Amp Noise. Analog Devices, 2009. (PDF). Kusuda Wong. Zero-Drift Amplifiers: Now Easy to Use in High Precision Circuits. Analog Dialogue. 2015.Vol. 49.

31. Клюев А.В., Самарин В.П., Клюев В.Ф. Алгоритм измерения мощности шумовых сигналов на фоне нерегулярных импульсных помех //

Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. № 1. С.76-79.

32. Нарышкин А.К., Врачев А.С. Теория низкочастотных шумов. М.: Энергия, 1972. 153 с.

33. Маранц В.Г., Хатунцев А.И. Параметры шумовых центров, влияющих на низкочастотный шум полевых транзисторов с р-п-переходом //Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1975. Вып. 8 (100). С. 88-105.

34. Dabrowsky W., Korbel K. Excess generation-recombination noise in reverse biased Schottky-barrier diodes //Solid-State Electron. 1988. Vol. 31. № 12. P. 1657-1661.

35. Лукьянчикова Н.Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Радио и связь, 1990. 295 с.

36. Пряников В.С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1978. 112 с.

37. Источники избыточного шума в транзисторных элементах микросхем /Н.Б.Лукьянчикова, Н.П.Гарбар, М.В.Партыка и др. //Радиотехника и электроника. 1988. Вып. 2. С. 400-408.

38. Van der Ziel A. On the noise spectra of semiconductor noise and flicker effect //Physica. 1950. Vol. 16. № 4. P. 359-372.

39. Дьяконова Н. В. , Левинштейн М. Е. , Румянцев С. Л, Природа объемного шума 1/f в GaAs и Si (обзор) ФТП // 1991.25 №12.С. 2065–2104.

40. Stoisiak M., Wolf D. Effects of phosphorus gettering on 1/f noise in bipolar transistors //Solid-State Electron. 1980.Vol. 23. № 11. P. 1147-1149.

41. Dutta P., Eberhard J.W., Horn P.M. 1/f noise in metal films: the role of the substrate //Solid-State Communications. 1978. Vol. 27. № 12. P. 1389-1391.

42. Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследованиях 1/f шума //УФН. 1983. Т. 141. Вып. 1. С. 151-176.

43. Van Vliet C.M. A survey of results and future prospects on quantum 1/f noise and 1/f noise in general //Solid-State Electron. 1991. Vol. 34. № 1. P. 1-21

44. Якимов А.В. Физика шумов и флуктуаций параметров. Электронное учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. 85 с.
45. Pellegrini B. On mobility-fluctuation origin of $1/f$ noise //Solid-State Electron. 1986. Vol. 29. № 12. P. 1279-1287.
46. Орешкин П.Т. Темновая релаксация заряда в ОПЗ барьерных слоёв. Изв. вузов СССР. Физика 1981. Т. 24. №9. С. 136-137.
47. Орешкин П.Т. Механизм перезарядки глубоких центров при релаксационной спектроскопии //Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1990. Вып. 5 (139). С. 3-8.
48. Oreshkin P.T. Barrier layers as resonators on deep centers //Phys. stat. sol. (a). 1991. Vol. 123. No. 2. P. 483-491.
49. Холомина Т.А. Физический механизм нестационарной спектроскопии глубоких уровней и генерации низкочастотного шума в барьерных слоях // Изв. вузов. Электроника. 1998. №2. С.22-27.
50. Холомина Т.А. Влияние центров с глубокими уровнями на процессы генерации НЧ-шума в барьерах Шоттки //Изв. вузов. Материалы электронной техники. 1998. № 2. С. 57-59.
51. Холомина Т.А Влияние глубоких центров на физические процессы в кремниевых барьерных структурах: дис. доктора физ.-мат. наук: 01.04.10. / Холомина Татьяна Андреевна. Рязань. 1999. 376 с.
52. Voss R.F., Clarke J. $1/f$ Noise from Systems in Thermal Equilibrium //Phys. Rev. Lett. 1976. V.36. Pp.42 - 47.
53. Pelz J., Clarke J. Dependence of $1/f$ noise on defects induced in copper films by electron irradiation //Phys. Rev. Lett. 1985. V.55. Pp.738-741.
54. Miller S.C. $1/f$ noise from surface generation and annihilation: Application to metal films //Phys. Rev. B. 1981. V.24. Pp.3008-3012.
55. Коган Ш.М., Нагаев К.Э. Низкочастотный токовый шум в твердых телах и внутреннее трение //ФТТ. 1982. Т.24. С. 3381-3388.

56. Томпсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах /Пер. с англ. М.: Наука, 1983. 368 с.
57. Celasco M., Fiorillo F., Mazzetti P. Thermal-Equilibrium Properties of Vacancies in Metals through Current-Noise Measurements //Phys. Rev. Lett. 1976. V.36. P.38-41.
58. Малахов А.Н., Якимов А.В. К вопросу о природе фликкерных флуктуаций //Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19. № 11. С. 2436-2438.
59. Якимов А.В. Диффузия примесей и дефектов и фликкерные флуктуации числа носителей в проводящих средах //Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1980. Т.23, № 2. С.238-243.
60. Орлов В.Б., Якимов А.В. Диффузия примесей и фликкерные флуктуации подвижности носителей тока в полупроводниках // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 12. С. 1584–1589.
61. Врачев А.С. Синтез сигнала со спектром $1/f$ типа на основании механической модели износа //Матер. докл. Междунар. науч.-техн. семинара «Шумовые и деградиационные процессы в полупроводниковых приборах». М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова. 1997. С. 114-125.
62. Врачев А.С. О структуре процесса со спектром $1/f$ типа //Матер. докл. Междунар. науч.-техн. семинара «Шумовые и деградиационные процессы в полупроводниковых приборах». М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова. 1998. С. 117-135.
63. Поляков М.Е. Возможная материальная причина фликкер-шума //Матер. докл. Междунар. науч.-техн. семинара «Шумовые и деградиационные процессы в полупроводниковых приборах». М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова. 1997. С. 58-63.
64. Левинштейн М. Е., Дьяконова Н. В. Шум $1/f$ в полупроводниках и полупроводниковых приборах//ФТП. 1989. 23.С. 283–291. <http://www.ioffe.ru/LNEPS/winter 2004/levinstein .pdf>.

65. Горлов М., Емельянов В., Жарких А., Строгонов А. Прогнозирование потенциально ненадежных полупроводниковых приборов по критериям низкочастотного шума // ChipNews. 2004. №6.

66. Горлов М.И, Емельянов А., Смирнов Д. Возможность отбраковки полупроводниковых приборов по уровню низкочастотного шума // Компоненты и технологии. 2005. № 8. С.198-201.

67. Сергеев В. А. , Резчиков С. Е. Аналоговый генератор НЧ-шума с регулируемым показателем формы спектра // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 6. С. 635–639.

68. Резчиков С. Е. Адаптивные алгоритмы и устройства автоматизированного измерения параметров низкочастотного шума полупроводниковых приборов. Автореферат дис. к-та техн. наук: 05.11.01/ Резчиков Сергей Евгеньевич. Ульяновск, 2020. 22 с.

69. Сергеев В. А. , Резчиков С. Е. Адаптивные алгоритмы измерения параметров низкочастотного шума полупроводниковых приборов в условиях массового контроля. // Измерительная техника. 2020. №11. С. 59-64.

70. Kholomina T.A., Litvinov V.G., Semenov A.R., Ermachikhin A.V., Maslov A.D. Investigation and simulation of voltage-noise characteristics of semiconductor barrier structures // 2017 IEEE 24th International Conference on Noise and Fluctuations. 2017. P. 1–4.

71. Семенов А.Р., Холомина Т.А. Прогнозирование надежности полупроводниковых приборов по параметрам вольт-шумовых характеристик. СТНО-2016 – Труды международной научно-технической и научно-методической конференции. Том 2. 2016. С. 212-218.

72. Кукоев И.Ю., Гуляев А.М. Количественные характеристики вейвлет анализа шумов полупроводниковых приборов //Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): материалы докл. науч.-технич. семинара. М.:МНТОРЭС им. А.С. Попова. 1999. С. 15-18.

73. Горлов М. И., Ануфриев Л. П., Бордюжа О. Л. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства. Минск: Интеграл, 1997. 390 с.

74. Описание (datasheet) электронного компонента «AD620» производства "Analog Devices" [электронный ресурс]. – 2018. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad620.pdf> (дата обращения: 14.05.2018).

75. 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.

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

77. 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.

78. 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. - Том 2. С. 127-128.

79. 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. Том 2. С 84-88.

80. 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.

81. Логинов Д.С., Холомина Т.А., Кельн Э.Э. Разработка системы управления блоком установки спектроскопии НЧ шума для исследования низкоомных объектов. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании». СТНО-2018. Сборник трудов. Том 2. Рязань: РГРТУ. 2018. С. 123-127.

82. Описание (datasheet) электронного компонента «CP2102» производства "Silicon Labs" [электронный ресурс]. – 2018. URL: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf> (дата обращения: 08.05.2018).

83. Описание (datasheet) электронного компонента «WH0802A-YYH-CT» производства "Winstar" [электронный ресурс].–2018.URL: <https://static.chipdip.ru/lib/243/DOC000243452.pdf> (дата обращения: 09.05.2018).

84. Разработка топологии печатной платы [электронный ресурс]. – 2018. URL: <http://www.techspirit.ru/spirens-810-1.html> (дата обращения: 15.05.2018).

85. Этапы разработки программного обеспечения [электронный ресурс]. – 2018. URL: <https://ru.intechcore.com/stages-software-development/> (дата обращения: 16.05.2018).

86. 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.

87. 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.

88. Логинов Д.С., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Рыбин Н.Б. 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.

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

90. 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.

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. 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 // ICNF 2019 – 25th International Conference on Noise and Fluctuation. Neuchâtel (Switzerland). 2019. P. 1-4.

95. Description of STM32F1 HAL and low-layer drivers [электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00154093-description-of-stm32f1-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf (дата обращения 07.09.2021).

96. Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC [электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf (дата обращения 06.09.2021).

97. AD8403 Digital Potentiometer [электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.analog.com/ru/products/ad8402.html#product-overview> (дата обращения 08.09.2021).

98. Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor [электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensorics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712> (дата обращения 14.09.2021).

99. Octal transceiver with direction pin 74ABT245D [электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.nexperia.com/products/analog-logic-ics/asynchronous-interface-logic/transceivers/74ABT245D.html> (дата обращения 16.09.2021).

100. Зинуков А.А., Логинов Д.С., Холомина Т.А., Семенов А.Р. Исследование параметров спектров НЧ шума герконовых контактов с повышенным сопротивлением. Международная научно-техническая и

научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании». СТНО-2022. Сборник трудов. Том 2. Рязань: РГРТУ, 2022. С. 75-78.

101. 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.

102. Логинов Д.С, Семенов А.Р., Холомина Т.А. Программа для расчета и визуализации зависимости спектральной плотности мощности низкочастотного шума. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615607 от 31 марта 2022 г.

103. Логинов Д.С, Кошкин И.О., Семенов А.Р., Холомина Т.А. Программа для расчета и управления микроконтроллером установки измерения флуктуационных характеристик электронных компонентов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681218 от 10 ноября 2022 г.

104. 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.

105. Что такое герконы [электронный ресурс]. – 2022. URL: <https://elektrik.info/main/fakty/417-cto-takoe-gerkony.html> (дата обращения: 15.03.2022).

106. Геркон [электронный ресурс]. – 2018. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Геркон> (дата обращения: 17.05.2018).

107. Геркон: технические характеристики [электронный ресурс]. – 2022. URL: <https://www.asutpp.ru/gerkon.html?amp> (дата обращения: 15.03.2022).

108. Goldstein J.I. [et al.] Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis / J.I. Goldstein, D.E. Newbury, P. Echlin, D.C. Joy, C.E. Lyman [et al.], Boston, MA: Springer US, 2003. 689 p.

109. Watt I.M. The principles and practice of electron microscopy / I.M. Watt, Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 484 p.

110. Упрощённая схема, иллюстрирующая работу РЭМ [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://konspekta.net/stydropedyaru/baza2/8344766904687.files/image013.jpg>. – (Дата обращения 16.08.2019).

111. 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.

112. Баскаков И.А., Карабанов С.М., Семин Е.В., Сиротина Т.А., Карбасов Б.Г., Устиненкова Л.Е. Контактное покрытие для магнитоуправляемых герметизированных контактов и способ нанесения контактного покрытия. Патент РФ МПК Н01Н1/02 Н01Н11/04. 12.10.2003.

113. Логинов Д.С., Шерова И.Ф., Холомина Т.А. Исследование влияния многократной коммутации (искусственного износа) магнитоуправляемых контактов на спектры низкочастотного шума. Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». 23-25 ноября 2022 г. Рязань, РГРТУ. С.135-142.

114. Розанов Ю.К., Акимов Е.Г., Пручкин А.И., Рябов М.Ю. Эрозия контактов в условиях гибридной коммутации// Электротехника.1998. №1, С. 1-6.

115. Разумихин М.А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов. - М.-Л.: Энергия, 1964. - 80 с.

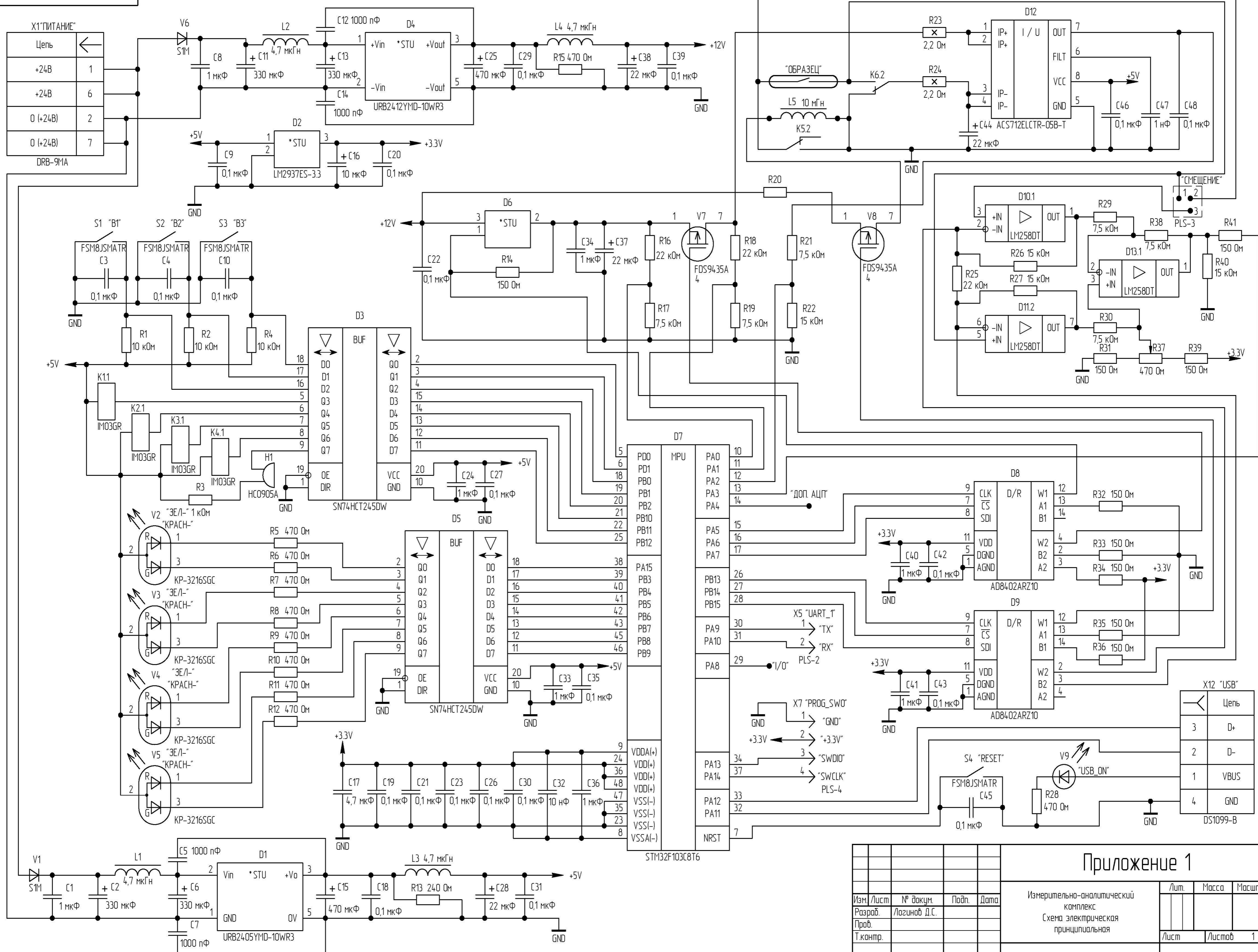
116. Ваткина М.А., Григорьев А.А. Оптимальный синтез физических явлений и процессов коммутации низковольтных гибридных аппаратов //Вестник ЧГПУ им. И.Я.Яковлева, 2014. № 4. С.4-14.

117. Баскакова А.В., Логинов Д.С., Рыбин Н.Б. Исследование структуры поверхности покрытий магнитоуправляемых контактов после их коммутационных испытаний// В сб. Современные технологии в науке и

образовании: СТНО-2021. IV международный научно-технический форум, Рязань, апрель 2021 г. С. 47-51.

118. Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Саблин В.А. Исследование и разработка методов модификации поверхности герметизированных магнитоуправляемых контактов // Сборник трудов второй Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», 1-3 октября 2008 г. Под ред. д.т.н. С.М. Карабанова. - Рязань: Изд. «Полиграф», 2009. 35с.

119. Гололобов Г.П., Арефьев А.С., Трегулов В.Р., Уточкин И.Г., Киреева О.В. Исследование поверхности магнитоуправляемых контактов методом атомно-силовой микроскопии // Вестник РГРТА. Вып. 13. 2003. С. 66-69.



Перв. примен.
Справа. №
Подп. и дата
Инд. №
Взам. инд. №
Подп. и дата
Инд. № подл.

Приложение 1

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Измерительно-аналитический комплекс Схема электрическая принципиальная	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.		Логинюв Д.С.				Листов		
Проб.								
Т.контр.								
Н.контр.								
Утв.								

Приложение Б. Свидетельства

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022615607

Программа для расчета и визуализации зависимости
спектральной плотности мощности низкочастотного
шума

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический
университет имени В.Ф. Уткина» (RU)*

Авторы: *Логинов Денис Сергеевич (RU), Семенов Андрей
Романович (RU), Холомина Татьяна Андреевна (RU)*

Заявка № 2022614003

Дата поступления 21 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 31 марта 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616185

**Программа для расчета и визуализации частоты
перегиба зависимости спектральной плотности
мощности низкочастотного шума**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический
университет имени В.Ф. Уткина» (RU)*

Авторы: *Логинов Денис Сергеевич (RU), Холомина Татьяна
Андреевна (RU), Кошкин Игорь Олегович (RU), Шерова
Ирина Федоровна (RU), Семенов Андрей Романович (RU)*

Заявка № **2023614602**

Дата поступления **13 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **23 марта 2023 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ю.С. Зубов'.

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022681218

**Программа управления микроконтроллером установки
измерения флуктуационных характеристик
электронных компонентов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В.Ф. Уткина» (RU)*

Авторы: *Логинов Денис Сергеевич (RU), Кошкин Игорь Олегович
(RU), Семенов Андрей Романович (RU), Холомина Татьяна
Андреевна (RU)*

Заявка № 2022680424

Дата поступления 28 октября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 ноября 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ю.С. Зубов', is written over a horizontal line.

Ю.С. Зубов

Приложение В. Акты о внедрении

РЯЗАНСКАЯ РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ КОМПАНИЯ Акционерное общество

Россия, 390044, г. Рязань, ул. Костычева, д.11, лит. А, помещение Н4, тел.: (4912) 37-76-32, факс (4912) 37-34-94
E-mail: post@zaortk.ru, ИНН 6227007386, ОГРН 1026200870717

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

Логинов С.Н.

« 20 » 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Логинова Дениса Сергеевича на тему

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

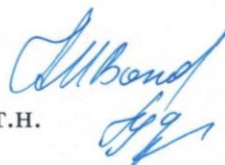
Комиссия Акционерного общества «Рязанская радиоэлектронная компания» в составе технического директора Иванова А.А. и ведущего инженера-конструктора, к.т.н. Гудкова С.М. рассмотрела вопрос об использовании результатов диссертационной работы Логинова Дениса Сергеевича и установила следующее:

Разработанный в рамках диссертационной работы измерительно-аналитический комплекс для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах успешно внедрен в технологический процесс входного контроля электромагнитных и герконовых реле.

Измерительно-аналитический комплекс используется для выявления и отбраковки непригодных электронных компонентов.

Технический директор

Ведущий инженер-конструктор, к.т.н.



Иванов А.А.

Гудков С.М.



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор РГРТУ
по учебной работе
А.В.Корячко

« 11 » 09 2023 г.

АКТ

об использовании материалов диссертационной работы «Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах» аспиранта Рязанского радиотехнического университета им. В.Ф.Уткина Логинова Дениса Сергеевича в учебном процессе

Настоящим подтверждаем, что при проведении учебного процесса по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» основной профессиональной образовательной программы академического бакалавриата «Микро- и нанoeлектроника» и по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» основной профессиональной образовательной программы академической магистратуры «Микро- и нанoeлектроника» в Рязанском радиотехническом университете им. В.Ф.Уткина использованы материалы кандидатской диссертации «Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах» Логинова Д.С.

Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при подготовке лекционных материалов и лабораторных практикумов по дисциплинам «Материалы электронной техники», «Методы исследования наноматериалов, микро- и наносистем» (академический бакалавриат), «Электронные процессы в твердом теле» (академическая магистратура).

Декан факультета электроники
к.т.н., доцент

Е.В. Сливкин

Заведующий кафедрой МНЭЛ
д.ф.-м.н., доцент

В.Г. Литвинов