

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва

д.т.н., профессор

С.А.Гаврилов

«17» января 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» на диссертационную работу Логинова Дениса Сергеевича «Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность задач, решаемых в диссертационной работе Логинова Д.С., обусловлена тем, что воспроизводимость и стабильность параметров электронных устройств связаны как с разработкой теоретических основ работы приборов и технологии их изготовления путем применения научно обоснованных конструктивно-технологических решений, так и достоверных методов контроля параметров материалов и приборов.

Разрешающая способность и точность современной измерительной аппаратуры во многом определяются низкочастотными (НЧ) шумами, которые ограничивают относительную точность измерения полезных сигналов невысокой амплитуды. В то же время спектроскопия низкочастотных шумов, особенно в инфранизком диапазоне до 10 Гц, является актуальным неразрушающим экспериментальным методом, позволяющим связать параметры спектров НЧ шума с особенностями физических свойств объектов исследования.

Значительная часть элементной базы современной электроники включает коммутационные устройства, предназначенные для периодического замыкания электрических цепей. Задача исследования коммутационной устойчивости различного рода контактов, как и других электронных компонентов, с применением современной измерительной техники является одной из важнейших в приборостроении.

Таким образом, тема представленной к защите диссертационной работы Логинова Д.С., посвященной разработке и созданию экспериментального автоматизированного измерительно-аналитического комплекса с уровнем собственного шума ниже уровня шума измеряемых образцов и исследованию характеристик шума коммутационных устройств, является актуальной и своевременной. Поэтому решаемые в диссертации задачи являются актуальными, научно значимыми и имеют несомненную практическую значимость.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

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, которые позволяют 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.

Значимость полученных результатов для науки и практики

Практическая значимость и научная ценность результатов и выводов диссертационной работы состоит в том, что разработанные технические решения и алгоритмы могут быть использованы для создания экспериментальных измерительных комплексов в НЧ шумовой диагностике различных объектов.

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.

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.

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.

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.

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 аппроксимации методом линейной регрессии и автоматический поиск точки перегиба аппроксимирующих прямых, что позволяет вычислить основные параметры спектра НЧ шума.

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.

Актуальность, законченность и практическая ценность диссертационной работы обоснована документально подтвержденным внедрением ее результатов, которые использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 и магистров по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника». 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).

Степень обоснованности и достоверности результатов, научных положений, выводов, рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается соответствием положениям существующих теоретических 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.

Предложенные в диссертации технические решения, методы и алгоритмы обоснованы. Их обоснованность и достоверность подтверждена результатами проведенных экспериментов,

а также применением разработанных решений на предприятии и в учебном процессе ВУЗа.

Оценка содержания

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, содержит 174 страницы, в том числе 168 страниц основного текста, 102 рисунка, 16 таблиц и список литературы из 119 наименований, в том числе работы автора. В качестве приложений приведены принципиальная схема разработанного экспериментального автоматизированного измерительно-аналитического комплекса, свидетельства о регистрации программ и акты внедрения результатов диссертационной работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень разработанности темы в научных публикациях, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и научные положения, выносимые на защиту, теоретическое и практическое значение работы, приведены данные о методологии и методах исследования, реализации и внедрении результатов, сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

Первая глава – это обзор и анализ литературных данных, описывающих основные характеристики и параметры низкочастотных шумов в твердом теле, а также методов их изучения. Автором проанализирован большой объем литературных источников, посвященных поднимаемым в диссертации проблемам. Проведен анализ существующих моделей генерации НЧ шума в твердых телах и электронных компонентах. Рассмотрены особенности прогнозирования надежности приборов и компонентов с помощью НЧ шумовой диагностики. На основе проведенного анализа сформулированы цель диссертационной работы и основные задачи исследований.

Во второй главе диссертантом представлены результаты разработки и технической реализации экспериментального измерительно-аналитического комплекса и специального программного обеспечения для автоматизированных испытаний коммутационных устройств. Комплекс позволяет проводить измерения спектров плотности мощности низкочастотного шума в диапазоне частот 0,01-100 Гц, а также многократную коммутацию магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле. Техническая реализация осуществлена автором с помощью 12 битного АЦП с обработкой и передачей данных в режиме реального времени без задержки и накопления сигнала, что позволяет наблюдать за процессом измерения в режиме реального времени.

Для проведения экспресс-диагностики параметров и коммутационной устойчивости низкоомных разрывных контактов с помощью НЧ шумовой спектроскопии в разработанном автором автоматизированном измерительном комплексе 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.

В результате схемотехнического решения автором реализована возможность гибкого управления режимом коммутационных испытаний объектов при заданных с высокой точностью значениях тока, напряжения и частоты переключения.

Решена одна из основных задач диссертации и достигнута цель: экспериментально установлено, что спектральная плотность мощности собственного шума разработанного и

реализованного комплекса оказалась не выше 10^{-15} В²/Гц, что на 3-4 порядка меньше СПМ шума в исследуемых коммутационных компонентах.

Для управления работой комплекса Логиновым Д.С. разработано специальное программное обеспечение в среде STM32CubeIDE 1.3.0. под используемый микроконтроллер STM32F103C8T6, который позволяет с высокой производительностью осуществлять обработку данных и одновременно работать с USB, ADC, GPIO, SPI по командам с ПК. За счет применения высокой тактовой частоты 48 МГц реализовано измерение, математическая обработка экспериментальных данных и передача информации для последующей аппроксимации и анализа в реальном масштабе времени. В разработанном программном обеспечении реализованы функции вывода полученной информации в текстовом и графическом форматах, а также загрузки файлов для получения спектров шума и вычисления основных параметров: СПМ и коэффициента формы спектра β .

Приведена таблица, в которой представлены параметры разработанного Логиновым Д.С. измерительно-аналитического комплекса: время и частотный диапазон измерения спектра НЧ шума, уровень собственного шума, ток, напряжение и частота коммутации, интерфейс передачи и формат вывода данных и др.

Третья глава посвящена описанию объектов и методик исследования. Автором диссертации приведены параметры изучаемых образцов коммутационных устройств, а также последовательность и методические особенности проведения экспериментальных исследований с помощью разработанного автоматизированного измерительно-аналитического комплекса. Необходимо отметить, что для исследования структуры и морфологии поверхности контактных пластин герконов использовалась аппаратура высокого качества, что обеспечивает достоверность полученных в работе результатов.

Разработанная в диссертационной работе методика, основанная на совместном применении экспресс-шумовой диагностики и многократных коммутационных испытаний, имитирующих естественный износ, позволяет прогнозировать коммутационную устойчивость магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле. Автором установлено, что предложенная в работе методика экспресс-диагностики при помощи НЧ шумовой спектроскопии продолжительностью менее 5 минут, за счет возможности изменения разрешающей способности и высокой частоты дискретизации АЦП, позволяет получить сведения об исследуемом объекте с достоверностью не менее 90% по сравнению с более длительными исследованиями в течение 30 и более минут.

Логиновым Д.С. разработаны алгоритм и программа, с помощью которых установлена возможность применения метода вариации (отклонения) Аллана к изучению спектров низкочастотного шума низкоомных объектов электронной техники. Полученные автором результаты позволяют утверждать, что в ограниченном диапазоне частот, который имеет место на практике, процесс генерации низкочастотного шума можно считать стационарным с возможностью применения соответствующих методов обработки результатов.

В четвертой главе представлены и проанализированы результаты исследования параметров и характеристик НЧ шума в низкоомных коммутационных устройствах, а также состава и морфологии поверхности контактных пластин герконов.

Активно обсуждаемая идея в научных публикациях, посвященных НЧ шумовой диагностике по применению специальных экстремальных воздействий на объект изучения с целью выявления наиболее «слабых» мест, преобразована автором диссертации в методику воздействия на исследуемые устройства двумя разными путями. Во-первых, реализованы многократные коммутационные испытания, имитирующие естественный износ контактов, во-

вторых, к забракованным по повышенному сопротивлению герконам применена специальная заводская обработка, которая привела к восстановлению параметров приборов. При этом шумовая экспресс-диагностика проводилась автором на всех этапах исследования. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности параметров спектров НЧ шума к конкретным особенностям воздействий на исследуемые коммутационные устройства.

Логиновым Д.С. исследовано влияние покрытия Au-Ru контактных пермаллоевых пластин на параметры НЧ шума и коммутационную устойчивость образцов. Экспериментально установлено, что создание стабилизирующего покрытия Au-Ru на поверхности пермаллоевых пластин магнитоуправляемых контактов позволило снизить величину контактного сопротивления в 1,5-2 раза, спектральную плотность мощности НЧ шума на 1-1,5 порядка, показатель формы спектра β – на 30-50%.

В диссертационной работе установлено, что многократная коммутация (искусственный износ) 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 .

Автором диссертации 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. 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 сопротивлением.

Выводы, сделанные по главам диссертации, интересны и обоснованы, использованы в заключении к диссертации.

Материалы диссертации Логинова Д.С. изложены достаточно полно и обоснованно, что дает возможность детального изучения полученных результатов.

В **заключении** в соответствии с целью и задачами диссертационного исследования сформулированы основные результаты, сделаны обобщения по выводам, ранее изложенным в разделах.

Степень завершенности диссертации

Все поставленные в диссертации Логинова Д.С. цели и задачи выполнены в полном объеме. Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, содержащую новые результаты, имеющие важное научное и практическое значение для создания измерительно-аналитических комплексов для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат отражает основные научные и практические положения диссертации. В автореферате диссертации изложены основные идеи и выводы диссертации, указан личный вклад автора в проведенные разработки и исследования, степень новизны и практическая значимость приведенных результатов исследований. Представленные в автореферате материалы соответствуют результатам и выводам, сделанным в диссертации.

Публикация основных результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в 27 научных работах, включая 5 публикаций в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 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, что соответствует п. 13 «Положения о присуждении ученых степеней».

Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертации соответствует п. 3 (Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики), п. 4 (Разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики), п. 6 (Разработка и создание средств автоматизации физического эксперимента) направлений исследований паспорта специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки).

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертации рекомендуются к использованию в проектных подразделениях и научно-исследовательских лабораториях организаций, специализирующихся в области разработки измерительного оборудования для проведения физических экспериментов; на предприятиях, производящих контактные электронные устройства; а также в учебно-исследовательских целях для подготовки специалистов.

Замечания по диссертации

1. В разработанном измерительно-аналитическом комплексе автором использован медленный интерфейс передачи данных в персональный компьютер (UART). В диссертации отсутствует объяснение, каким образом по такому интерфейсу могут передаваться значительные массивы измеренных данных.

2. Отсутствует сравнение параметров используемого микроконтроллера с параметрами его аналогов и соответствующее обоснование выбора с целью применения в разрабатываемом автоматизированном измерительно-аналитическом комплексе для испытаний низкоомных коммутационных устройств.

3. В главе 1 автором приведены аргументы в пользу необходимости тщательной экранировки измерительного оборудования для изучения низкочастотных шумов от внешних помех, однако в диссертационной работе предпринятые меры не описаны.

4. В диссертации отсутствует анализ существующих современных средств разработки программного обеспечения, а также обоснование выбора используемой автором среды программирования для ПК Delphi.

5. Из текста диссертации не ясно, являются ли примененные режимы коммутационных испытаний образцов по количеству коммутаций, пропускаемому току в цепи и напряжению регламентированными.

6. Текст диссертации содержит стилистические неточности и опечатки.

Заключение по диссертации

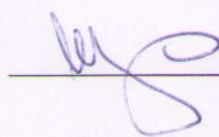
Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертационная работа Логинова Дениса Сергеевича «Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах» по актуальности, научной новизне, уровню и значимости полученных результатов, их достоверности, обоснованности выводов является **завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения по разработке экспериментального автоматизированного измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотного шума в низкоомных объектах, имеющие важное значение для развития экспериментальных физических методов исследования и электронной компонентной базы страны.** Тема диссертации и ее содержание полностью соответствует паспорту специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа Логинова Д.С. полностью отвечает требованиям утвержденного Правительством РФ постановления № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней», а автор диссертации Логинов Денис Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация и отзыв на диссертационную работу Логинова Дениса Сергеевича «Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах» обсуждены и одобрены на заседании Ученого совета института Перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» 17 января 2024г. (протокол заседания № 5).

Отзыв подготовил:

д.т.н., профессор института Перспективных
материалов и технологий Национального
исследовательского университета «Московский
институт электронной техники»



Алексей Анатольевич Шерченков
«17» января 2024 г.

Сведения о составителе отзыва

Тел: 8-(499) 710-14-98
E-mail: mfh.miet@gmail.com

Сведения о ведущей организации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

С отзывом ознакомлен 12.02.2024г. [подпись]