

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе

Логинова Дениса Сергеевича

«Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотных шумов

в низкоомных коммутационных устройствах»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы

Одним из важнейших направлений развития современной электроники является разработка надежной элементной базы. Диссертационная работа Логинова Д.С. посвящена решению актуальной научно-практической задачи – разработке, технической реализации и применению в научных исследованиях экспериментального автоматизированного измерительно-аналитического комплекса, который обеспечивает измерение спектральной плотности мощности низкочастотного (НЧ) шума, обработку результатов и проведение коммутационных испытаний.

Разрешающая способность и точность измерительных приборов во многом определяются низкочастотными шумами. Между тем, спектроскопия низкочастотных шумов является актуальным неразрушающим экспериментальным методом, позволяющим связать параметры спектров НЧ шума с особенностями физических свойств объектов исследования.

В современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) широко применяют коммутационные устройства с разрывными контактами, которые предназначены для периодического замыкания электрических цепей с током (реле, герконы и т.д.). В работе нашло отражение изучение возможности контроля качества и прогнозирования надежности исследуемых объектов, которая определяется точностью, достоверностью и возможностью автоматизации измерения параметров НЧ шума. Актуальность темы обусловлена разработкой измерительно-аналитического комплекса и использованием в экспериментальных целях НЧ диапазона.

Таким образом, тема диссертационной работы «Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик

низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах»
Логинова Д.С. является актуальной и имеет важное научное и практическое значение.

Цель и задачи диссертации Логинова Д.С., методы решения поставленных задач, полученные научные и практические результаты, научные положения соответствуют пунктам: п. 2 (Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики), п. 5 (Разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики), п. 7 (Разработка и создание средств автоматизации физического эксперимента) паспорта специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки).

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Результаты и научные положения, выносимые на защиту, получены автором лично, обоснованы, достоверны, обладают научной новизной.

Достоверность научных результатов работы обеспечивается

- 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.

Достоверность основных результатов диссертации Д.С.Логинова сомнений не вызывает.

Личный вклад

Автор диссертации во всех работах, выполненных в соавторстве, принимал участие в постановке задач, разработке, реализации и апробации экспериментального автоматизированного измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотного шума низкоомных коммутационных устройств и соответствующего программного обеспечения, получении, обработке и интерпретации экспериментальных результатов, написании научных статей и подготовке их к публикации. Автор диссертации представлял доклады по теме диссертации на

конференциях. Положения и результаты, выносимые на защиту, сформулированы и получены автором.

Научная новизна представленных в работе результатов

- Установлено, что в ограниченном диапазоне частот низкочастотный шум 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.

- 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).

- Разработана методика экспресс-диагностики магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле, позволяющая повысить быстродействие измерений 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.

- 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, сформулированные в диссертации, корректно обоснованы и обладают научной новизной.

Практическая значимость и научная ценность результатов работы

- 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 спектральной 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 спектральной плотности мощности НЧ шума реализована на основе разработанных алгоритма и специальной программы, позволяющей задавать режимы измерения спектров НЧ шума и проводить коммутационные испытания. 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.

- 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.

Разработанные Логиновым Д.С. автоматизированный измерительно-аналитический комплекс со специальным программным обеспечением и предложенные методики показали эффективность при проведении входного контроля коммутационных устройств на предприятии АО «Рязанская радиоэлектронная компания», научные результаты используются в учебном процессе кафедры «Микро- и нанoeлектроника» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

Практическая значимость и научная ценность результатов диссертации Д.С. Логинова сомнений не вызывают.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Результаты диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах международного и всероссийского уровня, 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, соискателем получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, что соответствует п. 13 «Положения о присуждении ученых степеней».

Оценка автореферата

В автореферате диссертации изложены основные идеи, методы их реализация и выводы диссертации, указан личный вклад автора в разработки и проведенные исследования, степень новизны и практическая

значимость приведенных результатов. Представленные в автореферате материалы соответствуют результатам и выводам диссертации. Автореферат и диссертация удовлетворяют критериям п.п. 9-11 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Объём диссертации – 174 страницы, в том числе 168 страниц основного текста, включает 16 таблиц, 102 рисунка и список литературы из 119 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, определены цель и основные задачи работы, научная новизна, научные положения, выносимые на защиту, практическая и научная значимость, достоверность результатов работы, отмечено внедрение результатов и апробация работы, личный вклад автора.

В первой главе представлен анализ литературных данных, посвященных современным представлениям о физических моделях генерации НЧ шума в твердых телах и электронных компонентах, проанализированы основные характеристики и параметры низкочастотных шумов в твердом теле, а также методы их изучения. Рассмотрены особенности прогнозирования надежности приборов и компонентов с помощью НЧ шумовой диагностики.

Указано, что многочисленные исследования свидетельствуют об актуальности изучения низкочастотного шума, спектральная плотность мощности (СПМ) которого описывается зависимостью $S(f) \sim 1/f^\alpha$. Особенности проявления низкочастотного шума в твердых телах являются объектом исследования в течение длительного времени, однако его природа в разных объектах остается до конца невыясненной.

Сделан вывод о том, что при создании экспериментальных установок необходимо использовать малошумящие усилители, обеспечивающие требуемую чувствительность в исследуемом диапазоне частот, современную элементную базу и обеспечивать тщательную экранировку оборудования.

Отмечено, что 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, создание такого комплекса и явилось основной целью диссертации.

Указано, что в основе теоретических моделей, которые в конечном итоге приводят к соотношению вида $S(f) \sim 1/f^\alpha$, как правило, лежат физические процессы с широким набором энергий активации и времен релаксации. Сделан вывод, что модели флуктуаций числа носителей и флуктуаций подвижности, которые лежат в основе теоретических моделей генерации низкочастотного шума в проводниках, в определенной мере «перекрываются» друг с другом. Результаты и выводы большинства опубликованных работ свидетельствуют о важной роли дефектов структуры материалов в процессах формирования шума.

На основе анализа опубликованных работ показано, что использование диагностики электронных компонентов по параметрам НЧ шума является перспективным, поскольку является неразрушающей и дает достоверные результаты по оценке их потенциальной надежности.

Вторая глава посвящена описанию разработки, технической реализации и исследования работы автоматизированного измерительно-аналитического комплекса, при помощи которого проведены эксперименты по многократной коммутации (искусственному износу) низкоомных коммутационных устройств и последующему исследованию спектров низкочастотного шума.

Для обеспечения работы комплекса автором разработано специальное программное обеспечение. Высокая тактовая частота 48 МГц позволила в реальном времени реализовать измерение, обработку и передачу измеряемой информации для последующей обработки и исследования.

Разработана программа, которая позволяет аппроксимировать характерные участки зависимости спектров НЧ шума с вычислением параметров – соответствующих показателей формы спектра НЧ шума γ .

Третья глава посвящена изложению методических аспектов проведения экспериментальных исследований.

Разработаны алгоритм и программа, с помощью которых установлена возможность применения метода вариации (отклонения) Аллана к изучению спектров низкочастотного шума низкоомных объектов электронной техники.

Установлено, что предложенная в работе методика экспресс-диагностики 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.

Разработаны и описаны методика и последовательность экспериментальных исследований параметров и характеристик низкоомных коммутационных устройств.

Четвертая глава посвящена описанию и анализу результатов исследования параметров и характеристик НЧ шума низкоомных коммутационных устройств, а также состава и морфологии поверхности контактных пластин герконов.

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.

Анализ экспериментальных результатов показал, что нанесение покрытия Au-Ru снижало величину контактного сопротивления герконов одной партии в среднем в 1,5-2 раза. Установлено, что в образцах с покрытием контактных пластин СПМ НЧ шума снижалась в среднем на 1-1,5 порядка за счет повышения инертности поверхности контактных пластин, на которых без покрытия возможно образование диэлектрических пленок. Наличие золото-рутениевого покрытия приводило к снижению показателя формы спектра γ на 30-50%.

На основании проведенных исследований выявлено, что спектральная плотность мощности НЧ шума является характеристикой, чувствительной к возможному отказу компонента.

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Основные результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях в производстве низкоомных коммутационных устройств, а также при входном контроле перед применением в качестве элементной базы. Кроме того, результаты

диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию в учебных организациях, занимающихся исследованием электрофизических процессов в элементах электронной техники, а также подготовкой высококвалифицированных кадров для данной области науки и техники.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. При разработке измерительного оборудования обычно используются АЦП с разрядностью 16 и 24 бита для проведения более точных измерений. Из текста диссертации неясно, почему при разработке автоматизированного измерительно-аналитического комплекса выбран встроенный 12 разрядный АЦП, а не внешний с большей разрядностью.

2. В работе не описаны используемые средства защиты от внешних воздействий и помех, например, наводки сети 50 Гц, шумов от прочего оборудования.

3. В разработанном комплексе передача данных реализована по интерфейсу USB. Из текста диссертации неясно, учтено ли при разработке комплекса, что блоки питания ПК имеют высокий уровень шума по цепям питания.

4. Неясной остается область применения разработки автора. Может ли разработанный автоматизированный измерительно-аналитический комплекс использоваться для исследования параметров, например, контактов соединителей или мощных контакторов.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы, не затрагивают научных положений и не влияют на достоверность полученных результатов. Структура работы в целом является последовательной, отдельные части логически взаимосвязаны.

Заключение. Диссертационная работа Логинова Д.С. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная проблема, имеющая существенное значение для развития страны – разработан, реализован и апробирован экспериментальный автоматизированный измерительно-аналитический комплекс, который обеспечивает в едином цикле автоматизированное измерение спектров низкочастотного шума, обработку результатов и проведение коммутационных испытаний низкоомных разрывных контактов.

По своей актуальности, новизне, научной и практической значимости представленная диссертация соответствует требованиям пунктов 9 - 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлениями Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 и № 415 в редакции от 18.03.2023, в части, касающейся кандидатских диссертаций, а ее автор Логинов Денис Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

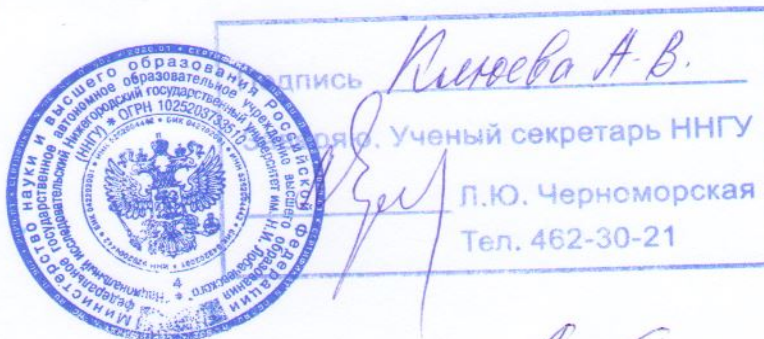
Официальный оппонент,
доцент кафедры статистической радиофизики
и мобильных систем связи радиофизического факультета
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,
доктор физико-математических наук, доцент Ключев Алексей Викторович

«22» января 2024 г.



Докторская диссертация защищена по специальности 01.04.03 –
Радиофизика.

Согласен на обработку персональных данных
Ключев Алексей Викторович, д.ф.-м.н., доцент,
доцент кафедры статистической радиофизики
и мобильных систем связи радиофизического факультета
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский
Государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.
Телефон: +7(831)465-61-53
E-mail: klyuev@rf.unn.ru



С аннотацией ознакомлен 12.02.2024.

