

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук

Мирошниковой Ирины Николаевны

на диссертацию **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 диссертации

Разработка новых приборов и методов экспериментальной физики, а также исследования, проводимые на этой аппаратуре, всегда представлялись крайне интересными для физиков-экспериментаторов, занимающихся изучением различных явлений и процессов, в данном случае связанных с шумовыми процессами в приборах и структурах. Особый интерес к такой аппаратуре наблюдается в настоящее время в условиях санкций. Поэтому актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений.

Экспериментальных установок в данной области немного: собственно, автор во введении перечислил основных авторов подобной аппаратуры в РФ. Обычно нижний предел такого оборудования ограничивается измерительным прибором – например, нановольтметром с предусилителем, по частоте – 0,3-1 Гц и по значению напряжения шума в режиме короткого замыкания – $10^{-15} \dots 10^{-17} \text{ В}^2/\text{Гц}$, т.е. нижний предел возможного измеряемого резистора по значению теплового шума в таких установок составлял 1 КОм при комнатной температуре на частоте выше 1 КГц. На меньших частотах шум $1/f$ самого измерительного тракта превышал шум резистора.

Вторая проблема известных установок – время съема самого спектра. Из литературы известно, что минимальная частота, на которой исследовался шум прибора, составляла 10^{-6} Гц, т.е. процесс только измерения составил несколько суток. Получить адекватную информацию о спектре шума за меньшее время – 3-5 минут – также интересная научно-практическая задача.

Автор резонно замечает, что нижние пределы чувствительности электронных приборов обычно определяются шумами тока и напряжения, а также тот факт, что спектроскопия низкочастотных (НЧ) шумов является актуальным неразрушающим экспериментальным методом, позволяющим связать параметры спектров НЧ шума с особенностями физических свойств объектов исследования, прогнозировать ресурс работы электронных компонентов.

Возможность адекватно оценить шум структуры с сопротивлением менее 3 Ом интересен ученым, не только изучающим реле и герконы, но и другие структуры, имеющие контакты с малым сопротивлением.

Структура и основное содержание работы

Можно считать удачной попытку диссертанта в первом разделе охватить характеристики и параметры НЧ шумов, методы их исследования в электронных компонентах, а также вопросы, связанные с прогнозированием надежности этих компонентов и параметрами НЧ шума. Особое внимание уделено методу вариации Аллана в изучении особенностей случайных процессов. Далее были рассмотрены варианты установок для исследования шума компонентов и методы борьбы с помехами. Возможно, эту часть имело смысл сократить, т.к. вопросы, связанные с сетевыми помехами и экранированием от внешних помех, являются достаточно банальными.

Также следует отметить направление, связанное со стационарностью моделей шума типа $1/f^\beta$, здесь диссертант выделил специфику распределения энергии активации и возможное отклонение показателя формы спектра β от ожидаемого. При этом автор резонно отмечает, что вопрос о стационарности

фликкерного шума остается открытым и требует расширения экспериментальной базы.

Вторая глава, является основной в диссертации и посвящена разработке измерительно-аналитического комплекса и программного обеспечения. В ней четко сформулирована цель - получение максимально воспроизводимых результатов исследования.

Импонирует прагматическая точка зрения диссертанта о подходе к разработке установки (подраздел 2.1): взяв за основу схему, известную в литературе, автор самостоятельно изготовил не только сам измерительный блок, но и плату коммутации, позволяющий тестировать магнитоуправляемые контакты с целью проверки износа этих контактов при многократных коммутациях (от 2000 до 10000 раз) на основе микроконтроллера STM32F030F4P6 и блок управления для нее. Более того, данная установка имеет значительный потенциал: внося незначительные изменения во входной каскад, на данной установке можно, при необходимости, исследовать спектр плотности мощности шума (СПМШ) объектов с большим сопротивлением, что особенно важно для разработчиков фотоприемников, у которых шум определяет основной параметр – обнаружительную способность, а СПМШ – возможный частотный диапазон применения фотопремников, а низкочастотный фликкер-шум – надежность разрабатываемых фотоприемников.

Благодаря применению разработанных алгоритма и программы, реализована возможность построения вариации Аллана с выделением типовых составляющих процесса генерации НЧ шума в рассматриваемых устройствах: шумы квантования, белый и фликкер-шум, а также винеровский процесс и линейный дрейф.

Третий раздел посвящен объектам (магнитоуправляемым контактам - герконовым реле) и методикам измерений. Автор показал свою заинтересованность в изучении объектов – привел выдержки по истории

создания приборов, что приятно импонирует, основные параметры контактов; обрисовал основные проблемы приборов данного типа: дребезг (шум), девиация (разброс) контактного сопротивления магнитоуправляемых контактов при многократной коммутации, низкий показатель коммутирующей мощности, хрупкость и вибрация.

В этом подразделе введено понятие передаточной характеристики для геркона при его включении как четырехполюсника при постоянном входном и разных токах, проходящих через герконы.

Оценены две возможные схемы замыкания контактов геркона в составе устройства: электромагнитной катушки и постоянного магнита. Постоянный магнит исключает лишний источник шума, однако здесь же показано, что использование электромагнитной катушки позволило достичь большей идентичности параметров повторных экспериментов по сравнению со случаями применения неодимового магнита или бариевого феррита с одинаковыми параметрами.

Стоит отдельно отметить сравнение показателей формы спектров β в СПМШ, проведенные автором методом подбора коэффициентов и методом линейной регрессии. Оба метода дали сопоставимые результаты, но добросовестность диссертанта стоит отметить.

В результате материала третьего раздела выявлены факторы, влияющие на воспроизводимость результатов измерения характеристик НЧ шума магнитоуправляемых контактов при их многократной коммутации (замыкании) с помощью магнитного поля от разных источников. Показано, что экспресс-анализ при относительно низком разрешении с последующей обработкой результатов с помощью вариации Аллана и анализа Фурье более чем на 90 % совпадает с результатами более длительной диагностики и с более высоким разрешением, т.е. выработана методика экспериментальных исследований параметров и характеристик низкоомных коммутационных компонентов, которая может быть применима на реальном производстве.

Четвертый раздел диссертации посвящен выявлению причин деградации исследуемых образцов. Автор использовал современную аппаратуру (растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6610LV, с приставкой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA X-Max20), провел тщательное сопоставление результатов анализа поверхности анода – состава материала анода и низкочастотной части СПМШ.

Сделал логичный вывод, что эрозия пермалловых контактов выражена сильнее, нежели у контактов с покрытием Au-Ru. Анализ показал, что нанесение покрытия Au-Ru снижает величину контактного сопротивления герконов в среднем в 1,5-2 раза, спектральной плотности мощности НЧ шума на 1-1,5 порядка, т.е. повышает надежность контактов. Автор связывает это явление с размером зерна поликристалла сплава Au-Ru и сплава Fe-Ni. Хотя это положение спорно, но сам факт желания автора найти причину изменения шума импонирует. Особенно хотелось бы отметить рисунок 4.9 (рис. 4 автореферата) – удачное и информативное сопоставление значений сопротивления, СПМ НЧ шума и коэффициента β .

Далее в разделе представлены результаты коммутационных испытаний и изучения структуры при помощи РЭМ образцов магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле. Сделанные выводы о росте контактного сопротивления, спектральной плотности мощности и показателя формы спектра НЧ шума на самых низких частотах при увеличении количества циклов коммутации логичны и не вызывают сомнения. Особенно хотелось бы отметить рис. 4.15 – по нему явно можно определить предельно допустимое число циклов коммутации (10^4).

Логинов Д.С. делает вывод о связи СПМ НЧ шума и числа флуктуаций подвижности носителей заряда (со ссылкой на работы Жигальского и Ван дер Зила): по мере искусственного износа контактов происходит рост рассеяния на дефектах структуры (на границе раздела проводящих покрытий), и снижение подвижности электронов при рассеянии на фононах

при повышении температуры контакта при смыкании за счет теплового действия дуги с образованием дефектов - кратеров. Этот вывод несколько смягчен фразой на стр. 138 о возможной флуктуации концентрации электронов в проводящих покрытиях электродов герконов и реле, что без сомнения правильно.

Далее исследовалось влияние восстановительной технологической обработки на параметры магнитоуправляемых контактов, забракованных по повышенному контактному сопротивлению. Показано, что восстановительная обработка привела к снижению СПМ НЧ шума на 2-3 порядка на частоте 0,01 Гц, что подтверждает необходимость исследования именно на ультранизких частотах, т.к. уже на частоте 0,1 Гц СПМШ совпадают. Анализ проведенных исследований показывает, что СПМ НЧ шума восстановленных герконов 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 10^4 , ранее таких результатов не наблюдалось. Однако после проведения испытаний на искусственный износ восстановленных герконов Логинов Д.С. обнаружил и привел результаты, свидетельствующие о резком росте контактного сопротивления, СПМ НЧ шума и коэффициента формы спектра β по сравнению с ростом аналогичных параметров образцов с «кондиционным» сопротивлением, указанном в паспорте (менее 1 Ом), что может свидетельствовать о потенциальной возможности отказа восстановленных компонентов.

По результатам работы в диссертации сформулированы выводы, а анализ полученных результатов (рост 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) можно охарактеризовать как научно-практические рекомендации и предложения, вытекающие из анализа

проведенных измерений.

Среди выводов диссертанта наиболее значимым представляется положение о том, что на основе анализа литературы разработан и технически создан новый измерительный комплекс, специальное программное обеспечение (с высокой тактовой частотой - 48 МГц и возможностью аппроксимация методом линейной регрессии и автоматического поиска точки перегиба, что позволяет вычислить основные параметры спектра НЧ шума) и методика математической обработки результатов, позволяющие проводить измерения спектров плотности мощности низкочастотного шума в диапазоне частот 0,01 - 100 Гц со спектральной плотностью мощности собственного шума не выше 10^{-15} В²/Гц для изучения физических явлений и процессов, проходящих в низкоомных резистивных структурах, в частности магнитоуправляемых контактов и электромагнитных реле при многократных коммутациях с помощью магнитного поля от разных источников (с количеством циклов 10^3 - 10^6) с целью возможного прогнозирования ресурса работы компонентов. 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. Создание такого комплекса имеет явное практическое значение.

На основе осуществленного в диссертации анализа тенденций развития понимания природы НЧ шумов был сделан вывод о том, что НЧ шум связан с флуктуациями подвижности (а, возможно, и концентрации) носителей заряда при фононном рассеянии. Данный вывод актуализирует необходимость изучения специфики низкочастотной области СПМШ приборов и относится к результатам, имеющим теоретическую ценность.

Также теоретическую ценность представляет положение о стационарности генерации НЧ шума, полученного на основе аналитических

соотношений метода вариации (дисперсии) Аллана, используя разработанный алгоритм и программу для изучения стационарности спектров низкочастотного шума магнитоуправляемых контактов.

Доказательством связи шум – надежность контакта может служить взаимосвязь сопротивление – значение СПМШ на определенной частоте – значение коэффициента формы спектра НЧ шума β , которые изменяются синхронно.

Связь надежность – значение СПМШ и показателя формы спектра НЧ шума подтверждена изменением площади пятен контактной эрозии, обнаруженная Автором. Этот результат имеет явную практическую ценность.

Также практическую ценность представляет вывод об ограничении срока эксплуатации восстановленных магнитоуправляемых контактов, т.к. несмотря на первоначальное снижение сопротивления в 3-8 раз, а также СПМ НЧ шума в среднем на 3 порядка и коэффициента формы спектра β до 2,5 раз при последующем искусственном износе уже восстановленных герконов наблюдался более резкий рост контактного сопротивления, СПМ НЧ шума и коэффициента формы спектра β по сравнению с ростом аналогичных параметров образцов с кондиционным R_n .

Показано, что разработанная методика экспресс - диагностики при помощи спектроскопии НЧ шума продолжительностью менее 5 минут, позволяет получить сведения об исследуемом объекте, совпадающие с полученными в результате более длительных исследований, не менее чем на 90%. Этот метод также имеет практическую ценность при использовании его на промышленных предприятиях.

Научная новизна

Проведена разработка программно-аналитического комплекса для исследования результатов физических измерений низкочастотного (0,01 - 100 Гц) спектра мощности шума (СПМШ) низкоомных объектов (в частности

магнитоуправляемых контактов), содержащая оригинальные технические решения: достаточно низкий собственный шум комплекса (не выше 10^{-15} В²/Гц), возможность проводить многократные коммутации, имитирующие естественный износ, с помощью магнитного поля (с количеством циклов 10^3 - 10^6) с целью возможного прогнозирования ресурса работы компонентов. Выполнен комплекс исследований контактов, позволивших связать изменение сопротивления с характеристиками СПМШ и сделать вывод о возможности прогнозирования надежности контактов экспресс-методом за счет авторских схмотехнических и программных решений.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается значительным объемом и воспроизводимостью тестовых экспериментов, использованием современной схмотехнической базы, в том числе растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV, непротиворечием сделанных выводов с положениями физики тонких пленок, изложенной в приведенной литературе.

Апробация результатов проводилась на конференциях различного уровня и экспертизой опубликованных статей в рецензируемых журналах.

Замечания

1. Первая глава, посвященная основным характеристикам и методам изучения низкочастотного шума, показывает высокую эрудицию автора, однако имело смысл сократить подразделы 1.3 и 1.4, выбирая механизмы, относящиеся к объектам измерения и исключая объемное цитирование источников. Если выбрать конечное число механизмов, которые, по мнению автора, можно проверить на его объектах, можно проверить вероятность конкретного механизма.

2. Хотелось бы в конце первой главы в Выводах видеть более четкие формулировки задач, не решенных в работах рассмотренных авторов проблем, например, существуют установки для исследования СПМШ для

объектов с сопротивлением свыше 1 КОм, но вообще не рассматривался шум объектов с сопротивлением менее 3 Ом; для данных объектов не рассмотрены условия стационарности шумов и т.д.

3. Описание работы измерительно-аналитического комплекса можно было вынести в Приложение.

4. Не понятен смысл приведения СПМШ без усреднения: обилие точек после преобразования Фурье заглушают информацию на частотах уже более 10 Гц. Так, на рис. 3.13 (b, c) почему-то не проанализирован перепад СПМШ в области 100 Гц. На рис. 3.13, а его нет. Чем он обусловлен?

5. Оформление работы имеет ряд недостатков.

- В диссертации встречаются нерасшифрованные сокращения (БИХ – бесконечная импульсная характеристика, стр. 10).

- Данные по характеристикам микроконтроллера (Таблица 2.2), схему преобразования (рисунок 2.10), функциональную схему цифрового потенциометра (рисунок 2.11) и т.п. следовало бы вынести в приложения, а в тексте диссертации подчеркнуть те изменения и доработки, которые были сделаны Автором.

- На рисунке 2.16 неудачно выбран масштаб – конечно, он подчеркивает малый шум комплекса при коротком замыкании, но имело бы смысл привести СПМШ при холостом ходе – для выявления границ возможных измерений, СПМШ, например, образца с сопротивлением 1...3 Ом.

- На рисунках 2.21, 2.23 представлены СПМШ значительно превышающем СПМШ на рисунке 2.16, но не сказано, с каких образцов они получены! Неясно, можно ли в выходном интерфейсе менять диапазон выводимых значений СПМШ или фразы, исходя из каких соображений выбран столь неудачный диапазон.

- Вероятно, текст в некоторых местах можно было сократить – выбросить вопросы стоимости компонентов, рисунок 2.1, т.к. частотная зависимость ОУ AD620 дана от частоты 100 Гц, а Автор разрабатывает

установку ниже 100 Гц. Фразы типа «Четкое следование этапам разработки программного обеспечения является основополагающим критерием для создателей ПО...» (стр. 66) также плохо подходят для диссертации. Аналогично фразы на стр. 70.

- Фраза «Используя метод вариации Аллана в совокупности с преобразованием Фурье, можно получить дополнительную информацию об исследуемом объекте» (стр. 86) требует либо пояснения, либо отсылки к страницам текста, где обсуждается эта информация.

- Рисунок 2.26 не читаем.

- Первый и третий абзацы на стр. 88 следовало перенести в Заключение, пока не дошли до экспериментальных исследований, о параметре β ничего не говорилось.

- На рис. 3.8 выбран неудачный масштаб: надо было приводить одинаковые масштабы, а не отличающиеся на 4 порядка! Аналогичные замечания по рисункам 3.9, 3.10, 3.11.

- Неудачна формулировка абзаца на стр. 108: «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». О контактной эрозии ничего не было сказано. Далее автор обращается к вариации Аллана.

- Рисунки 4.3 и 4.4 требуют более развернутого обсуждения: что здесь изображено? На что обратить внимание?

- Рисунок 4.10 следовало бы поместить в раздел 3 (Объекты и методика исследования).

- Имеются опечатки на стр. 60 (как отмечено в разделе 2 вместо 1); стр. 134 (рис. 4.21): на рисунке ток 0,3 А, в тексте под рисунком - 0,1 А; стр. 149 и др.

Заключение

Структура и логика изложения материала в диссертации выглядят достаточно обоснованными. Цели и задачи исследования, сформулированные автором, были вполне достигнуты. Работа написана логично, доказательно, ясным и строгим научным языком, особенно хочется отметить первый раздел. Стиль и оформление работы не вызывают замечаний.

Диссертация Логинова Дениса Сергеевича является целостным, самостоятельным научным исследованием, отличающимся своей новизной. Диссертация представляет определенный интерес не только для научного сообщества, но и для практической деятельности на предприятиях соответствующего профиля, так как в её основу положена возможность усовершенствования технологии изготовления низкоомных герконов и иных коммутационных устройств.

Представленная к защите диссертация и автореферат Логинова Дениса Сергеевича на тему «Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах» представляют теоретическую и практическую ценность, а автор показал себя способным и профессионально состоявшимся научным исследователем. Диссертационная работа носит теоретический и прикладной характер, является оригинальным, самостоятельным исследованием.

В целом, представленные диссертация и автореферат на тему «Разработка измерительно-аналитического комплекса для исследования характеристик низкочастотных шумов в низкоомных коммутационных устройствах» полностью соответствуют 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, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроники и нанoeлектроники, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.



Мирошникова Ирина Николаевна

«08» февраля 2024 г.

*Подпись
установлено*



Заместитель Начальника

Почтовый адрес: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1

Тел.: 8(495)362-75-96

E-mail: MiroshnikovaIN@mpei.ru

С отзывом ознакомлен 28.02.2024г.

