

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Ломан  
Валентин Алексеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ПОДАВЛЕНИЯ  
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ  
С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
профессор Коробейников Сергей Миронович

Новосибирск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1    ОБЗОР    ЛИТЕРАТУРЫ    ПО    ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМ .....	11
1.1 Влияние грозовых перенапряжений на объекты электроэнергетики.....	11
1.2 Анализ аварийности в сетях .....	12
1.3 Типы грозовых перенапряжений.....	18
1.4 Влияние высокочастотных коммутационных перенапряжений.....	22
1.5 Защита от перенапряжений.....	24
1.5.1 Классические средства защиты.....	24
1.5.2 Разрабатываемые, перспективные и инновационные средства защиты от высокочастотных перенапряжений.....	29
1.5.3 Применение скин-эффекта в защите от высокочастотных перенапряжений.....	30
Выводы по Главе 1 .....	34
ГЛАВА 2    НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	35
2.1 Испытания на переменном напряжении.....	35
2.1.1 Экспериментальная установка и методика измерений.....	35
2.1.2 Эксперименты с изменением конфигурации проводников.....	37
2.1.3 Эксперименты с круглым и плоским многослойным образцом.....	43
2.1.4 Эксперименты с изменением числа слоёв проводника .....	45
2.1.5 Расчет влияния параметров «Толщина/ширина проводника/число слоев проводника».....	47
2.1.6 Эксперименты с различной ориентацией проводника в макете.....	50
2.1.7 Изготовление макетов частотнозависимых устройств .....	53
2.1.8 Низковольтные измерения макетов частотнозависимых устройств.....	55
2.2 Испытания на импульсном напряжении .....	57
2.2.1 Экспериментальная установка .....	57
2.2.2 Методика измерения .....	59
2.2.3 Результаты измерений.....	60

Выводы по Главе 2 .....	65
ГЛАВА 3 СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	66
3.1 Экспериментальная установка.....	66
3.2 Результаты сильноточных испытаний .....	68
3.2.1 Результаты для образцов частотнозависимых устройств на частотах 140 и 130 кГц .....	68
3.2.2 Результаты для образцов частотнозависимых устройств на частотах 280 и 250 кГц .....	70
3.2.3 Результаты для образцов частотнозависимых устройств на частотах 300 и 280 кГц .....	71
3.2.4 Анализ полученных результатов .....	72
Выводы по Главе 3 .....	74
ГЛАВА 4 ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЧАСТОТНОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА .....	76
4.1 Анализ результатов опытной эксплуатации .....	76
4.2 Компьютерное моделирование эффективности частотнозависимого устройства при подавлении полного импульса и импульса обратного перекрытия .....	79
4.3 Расчёты индуктивности частотнозависимых устройств.....	83
4.3.1 Расчет индуктивности частотнозависимого устройства с круглым проводником.....	83
4.3.2 Результаты расчета частотнозависимых устройств с круглым проводником.....	85
4.3.3 Расчет индуктивности частотнозависимого устройства с плоским однослойным проводником .....	90
4.3.4 Результаты расчета частотнозависимых устройств с плоским однослойным проводником .....	93
4.4 Расчет толщины ферромагнитного слоя.....	94
4.4.1 Толщина скин-слоя при грозовом импульсе.....	94

4.4.2 Толщина ферромагнитного слоя для компенсации магнитного насыщения .....	95
4.5 Расчет тепловой устойчивости частотнозависимых устройств .....	97
4.5.1 Тепловая устойчивость частотнозависимых устройств под действием тока короткого замыкания .....	97
4.5.2 Тепловая устойчивость под действием грозových импульсов .....	98
4.6 Расчет электродинамической устойчивости катушек частотнозависимых устройств.....	99
Выводы по Главе 4.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ А РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 КВ.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ В ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Г СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	126

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Воздушные линии электропередач являются наиболее частым объектом грозовых воздействий из-за своей протяженности, особенно в районах с высоким сопротивлением грунта, таких как, например, районы Крайнего Севера. В этих районах существенным фактором, повышающим затраты на обслуживание электрооборудования, является труднодоступность объектов энергетики для осуществления ремонтных и профилактических работ на воздушных линиях [1]. В зависимости от места удара молнии могут образовываться срезанные импульсы и импульсы обратного перекрытия, имеющие большую крутизну, которые представляют наибольшую опасность для продольной изоляции трансформаторов за счет мгновенного скачка напряжения на витках обмоток [2].

В России наиболее распространенным методом защиты подстанций от грозовых перенапряжений является применение нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) [3]. ОПН устанавливаются в основном в сетях 110 кВ и выше позволяют ограничивать амплитуды набегающих импульсов и обеспечивать защиты от перенапряжений [4-6].

Однако ОПН имеют ряд существенных недостатков. В первую очередь, эффективная работа ОПН обеспечивается лишь при установке одновременно на всех фазных проводах защищаемой цепи на каждой опоре защищаемого участка трассы [7, 8] и при наличии подходящих параметров заземления [9]. Отсутствие искровых промежутков обуславливает протекание через ОПН утечки под действием рабочего напряжения сети частотой 50 Гц. При больших значениях этих токов может произойти перегрев варистора и выход ОПН из строя. Самое важное, это то, что ОПН не могут повлиять на крутизну фронта воздействующих грозовых перенапряжений. Причем в некоторых случаях срабатывание ОПН может повлечь за собой повышения крутизны набегающей волны за счёт превращения волны в волну с крутым фронтом [10].

Таким образом, если, например, рассматривать силовые трансформаторы, то ОПН снижают уровень грозовых перенапряжений, воздействующих на главную

изоляцию (между обмоткой высокого напряжения и заземленным баком), но не снижают градиентные перенапряжения, воздействующие на продольную изоляцию (между витками). При этом ситуация многократно ухудшается в условиях низкого сопротивления грунта, при которых стандартные по правилам устройства электроустановок (ПУЭ) меры защиты, уже не эффективны и не перекрывают недостатков ОПН [11].

Наиболее перспективным с точки зрения простоты эксплуатации и применения видится использование защитных устройств основанных на применении композитных материалов (проводник-диэлектрик, проводник-ферромагнетик и. т.д.) [12-17]. За счет работы аномального скин-эффекта, эти частотнозависимые устройства могут эффективно подавлять высокочастотные перенапряжения, при этом быть достаточно компактными и их параметры, а также эффективность работы не зависят от сопротивления грунта.

Несмотря на высокую эффективность этих устройств, следует отметить и ряд моментов которые требуют своего решения для выхода в широкую эксплуатацию этих устройств: невысокое омическое сопротивление на высоких частотах, большие габариты устройства, не исследованы возможности применения на подстанциях других классах напряжений (например 35 кВ), нет информации об оптимальных габаритах устройств для обеспечения максимальных эксплуатационных параметров (для устройств для ВЛ 35 кВ), открыт вопрос об обеспечении надежности многократных контактов проводников. Следовательно, исследования частотнозависимых устройств (ЧЗУ), направленные на решение указанных проблем, являются актуальными.

### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросами защиты воздушных линий от высокочастотных перенапряжений грозовой и коммутационной природы, в том числе применения скин-эффекта занимались как отечественные, так и зарубежные учёные: Ефимов Б.В., Гумерова Н.И., Селиванов В.Н., Подпоркин Г.В., Коробейников С.М, Халилов Ф.Х., Суворов Д.В., Гашимов А.Ф., Мехтиев Т.Р., Боргетти А., Пьянтини А., Рашиди Ф. Несмотря

на это, исследование и разработка устройств по-прежнему остаётся актуальным вопросом.

**Целью** работы является:

Повышение эффективности подавления высокочастотных перенапряжений устройствами на основе скин-эффекта для защиты подстанций 35 – 110 кВ.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- провести анализ опасности грозовых воздействий для оборудования подстанций и способов повышения эффективности скин-эффекта;
- провести низковольтные испытания макетов частотнозависимого устройства для оценки роста сопротивления с ростом частоты;
- провести сильноточные испытания макетов частотнозависимого устройства для оценки влияния больших токов на частотнозависимые параметры;
- провести расчеты и эксперименты по изменению конструкции частотнозависимого устройства, и оценку возможности управления индуктивностью частотнозависимого устройства.

**Научная новизна:**

1) проведено экспериментальное сравнение различных способов повышения высокочастотного сопротивления частотнозависимого устройства и подтверждено, что изменением формы проводника в катушке можно добиться повышения сопротивления и индуктивности устройства;

2) предложен плоский однослойный профиль проводника частотнозависимого устройства с ферромагнитным покрытием и показана высокая эффективность применения новой формы в конструкции при ориентации плоскости проводника перпендикулярно направлению магнитного поля катушки;

3) путем анализа мониторинга работы частотнозависимого устройства в условиях опытной эксплуатации на подстанции «Сугмутская» показана эффективность подавления высоковольтных высокочастотных импульсов;

4) показана высокая эффективность частотнозависимого устройства в подавлении срезанных и импульсов обратного перекрытия путем моделирования в системе «Comsol Multiphysics».

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

- показано, что профилированием проводника с ферромагнитным покрытием можно регулировать частотнозависимые характеристики частотнозависимого устройства;

- предложен новый профиль проводника частотнозависимого устройства в катушке, обеспечивающий повышенные параметры индуктивности, активного сопротивления и меньшие массогабаритные характеристики;

- рассмотрена конструкция частотнозависимого устройства для воздушных линий 35 кВ с плоским однослойным проводником с ферромагнитным покрытием и подтверждена её эффективность по сравнению с исполнением частотнозависимого устройства на основе круглых проводников;

- проведены расчёты и анализ влияния геометрических параметров частотнозависимого устройства, позволяющие провести оптимизацию конструкции устройства для воздушных линий 35 кВ и 110 кВ. Данные результаты применены в проекте реконструкции и модернизации подстанции ПС 220/110/35/6 кВ «Факел» филиала «Нижневартовские электрические сети» АО «Россети-Тюмень», что подтверждается актом внедрения;

- путем анализа мониторинга работы ЧЗУ в условиях опытной эксплуатации на подстанции «Сугмутская» и моделирования его работы подтверждена эффективность подавления высоковольтных высокочастотных импульсов, в частности срезанных грозовых импульсов, импульсов обратного перекрытия.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1) использование плоского однослойного профиля проводника в конструкции частотнозависимого устройства позволяет получить наибольшие значения высокочастотного сопротивления;

2) частотнозависимое устройство наиболее эффективен при подавлении срезанных грозовых импульсов и импульсов обратного перекрытия;



3) частотнозависимое устройство имеет высокое сопротивление на высоких частотах, как при протекании слабых, так и сильных токов.

### **Методы исследования**

Решение поставленных задач осуществлялось на основе теоретического и экспериментального методов исследования.

Теоретический метод включает: анализ существующих методов защиты от высокочастотных перенапряжений; оценка влияния формы проводника на скин-эффект, анализ данных по эффективности использования ЧЗУ, компьютерное моделирование ЧЗУ при подавлении высокочастотных импульсов.

Экспериментальный метод включает: измерение частотных зависимостей параметров макетов ЧЗУ на переменном и импульсном напряжении; разработку конструкции макетов ЧЗУ; проведение высокоточных измерений макетов ЧЗУ.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus / Web of Science. Получены свидетельство на программу для ЭВМ и патент на полезную модель.

### **Апробация работы**

Результаты были представлены на 13 научных конференциях, в том числе таких, как:

- Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», Иркутск, 2017;
- Международный энергетический форум 47 CIGRE SESSION, Paris, France, 2018;
- Международная конференция «2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials» EDM, Парк-отель Ая, 2021;
- Научно-практическая конференция «Силовые трансформаторы – производство, эксплуатация, диагностика и ремонт. Общие вопросы диагностирования и эксплуатации электрооборудования», Екатеринбург, 2021

- XV Международная научно-техническая конференция «Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering» АРЕИЕ, Новосибирск, 2021.
- 7-ая Российская конференция по молниезащите, Санкт-Петербург, 2022;

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается современными методами исследования, которые соответствуют поставленным в работе целям и задачам. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены фактическими данными, наглядно представленными в приведённых таблицах и рисунках. Полученные результаты не противоречат результатам других исследований и научных работ.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 127 наименований и 4 приложения. Общий объем работы составляет 126 страниц, включая 78 рисунков и 29 таблиц.

# ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМ

## 1.1 Влияние грозových перенапряжений на объекты электроэнергетики

Воздушные линии, из всех объектов электроэнергетики, имеют наибольшую протяженность, в связи с чем, они наиболее подвержены ударам молний. При этом большая протяженность воздушных линий накладывает трудности на обеспечение надежной грозоупорности воздушных линий. Особенно актуально для регионов с высоким сопротивлением грунта, таких, например, как районы Крайнего Севера. В этих районах кроме большой протяженности и высокого сопротивления грунта, также имеется фактор труднодоступности для осуществления ремонтных и профилактических работ на воздушных линиях, который увеличивает задержку возобновления подачи электроэнергии, вызванную неполадками на воздушных линиях (ВЛ) и подстанциях (ПС) [1]. На это накладываеься длительный срок эксплуатации существующих воздушных линий, составляющий по меньшей мере 30 – 50 лет, что в еще большей мере снижает эффективность применяемых средств защиты.

Удары молний сопровождаются образованием и приходом на подстанции грозových волн. Проведенные исследования показывают, что перенапряжения могут быть одной из причин утренних отключений ВЛ. Предполагается что перенапряжения вызывают перекрытие загрязненной или увлажненной изоляции линии, и при этом не фиксируются регистрирующей и измерительной аппаратурой, из-за высокой частоты и короткой длительности сигнала [18].

Можно также отметить и актуальность развития грозозащиты для солнечных и ветровых электростанций. Сейчас идет активный переход и развитие технологий использования возобновляемых источников энергии. При этом специфика применения солнечных электростанций такова, что требуются большие площади, занимаемые солнечными панелями. Это, в свою очередь, повышает вероятность попадания молний в панели. При этом используются такие станции часто на удалении от развитой инфраструктуры, эти факторы значительно затрудняют

мероприятия по ремонту, замене составляющих, а также повышают значимость бесперебойного питания [19].

## 1.2 Анализ аварийности в сетях

Актуальность проблемы защиты от грозových воздействий подтверждается большим количеством отключений и повреждений оборудования под действием грозových перенапряжений. В качестве примера представлены данные по технологическим нарушениям и повреждениям, полученным от энергосетей.

Так, например, по данным Красноярскэнерго за 2014-2020 года (рисунок 1.1), видно большое количество различных технологических нарушений по причине «атмосферные перенапряжения» на воздушных линиях и подстанциях (ПС) 35-110 кВ.

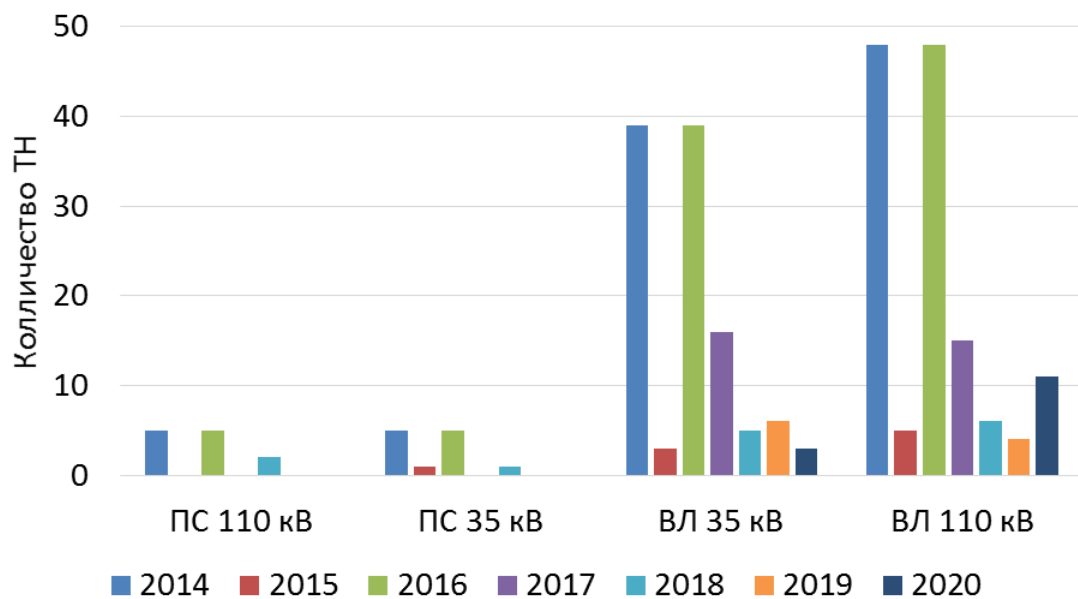


Рисунок 1.1 – Количество технологических нарушений по причине «атмосферные перенапряжения» на ВЛ и ПС 35-110 кВ за 2014 – 2020 г

На рисунках 1.2 и 1.3 показаны основные причины технологических нарушений (ТН при атмосферных перенапряжениях за 2014-2020 годы. Из-за большого количества единичных и редких нарушений на рисунке 1.4 для воздушных линий (ВЛ) 35 – 110 кВ показаны только причины, повторяющиеся в течении минимум 3 лет, или которые были выявлены более 3 раз.

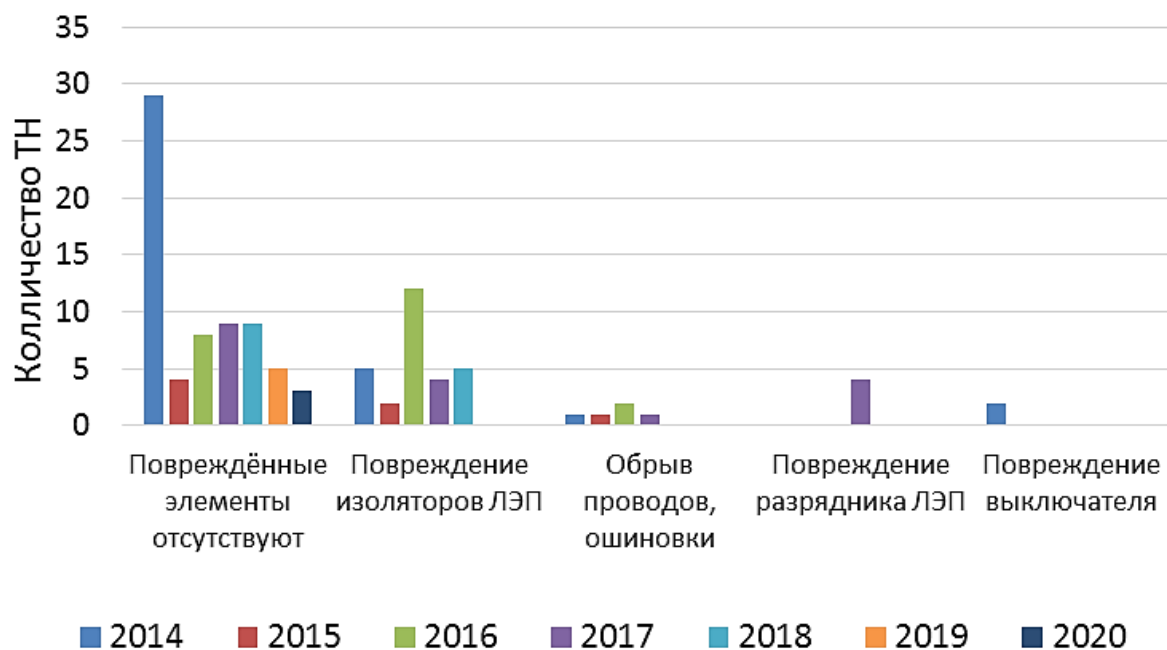


Рисунок 1.2 – Причины технологических нарушений при атмосферных перенапряжениях на ВЛ 35 кВ

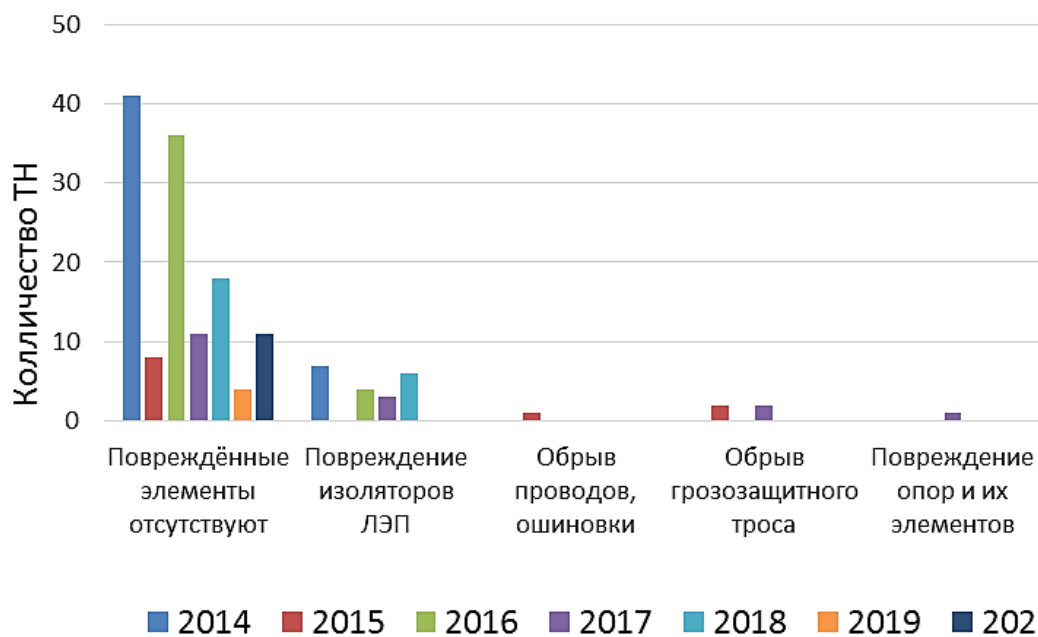


Рисунок 1.3 – Причины технологических нарушений при атмосферных перенапряжениях на ВЛ 110 кВ

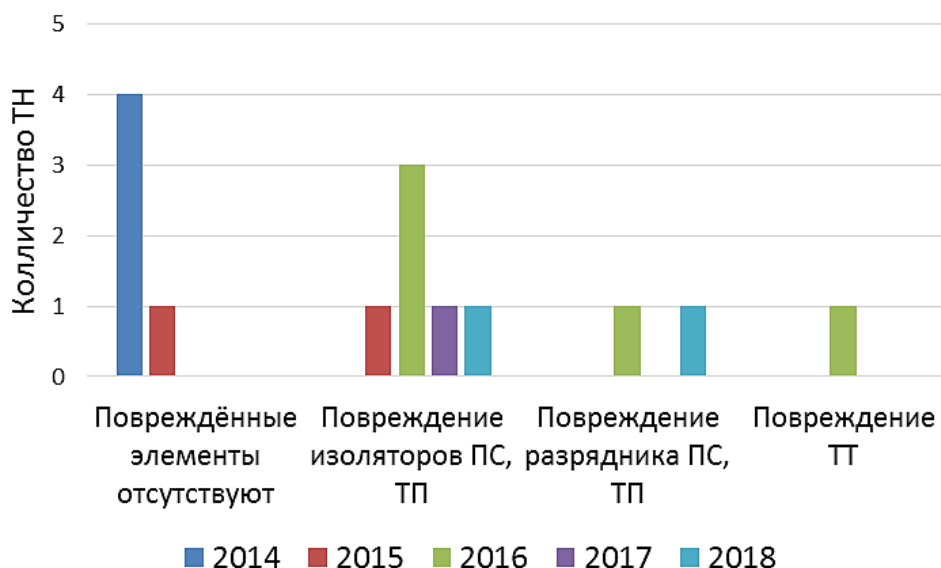


Рисунок 1.4 – Причины технологических нарушений при атмосферных перенапряжениях на ПС 35-110 кВ

Видно, что атмосферные перенапряжения вызывают различные виды повреждений. Следует отметить, что отсутствие выявленных повреждённых элементов, не означает, что воздействие прошло без следа, так как возможны различные мелкие дефекты и нарушения, например, замыкание нескольких витков трансформатора, которые не приводят сразу к разрушению, но имеют накопительный эффект и могут проявить себя в ходе дальнейшей эксплуатации. Следует отметить малую изученность эффектов, которые оказывают высокочастотные перенапряжения малой амплитуды на межвитковую изоляцию трансформаторов. Это связано, в том числе и со сложностью выявления повреждаемости витков и их изоляции.

Похожая картина наблюдается и в энергосетях ОАО «ФСК ЕЭС» – магистральных электрических сетях (МЭС) Юга. На рисунке 1.5, показаны причины повреждений воздушных линий 10 - 110 кВ за период 2014-2020 год. На рисунке представлена информация только по причинам, выявленным более 10 раз за все 7 лет контроля.

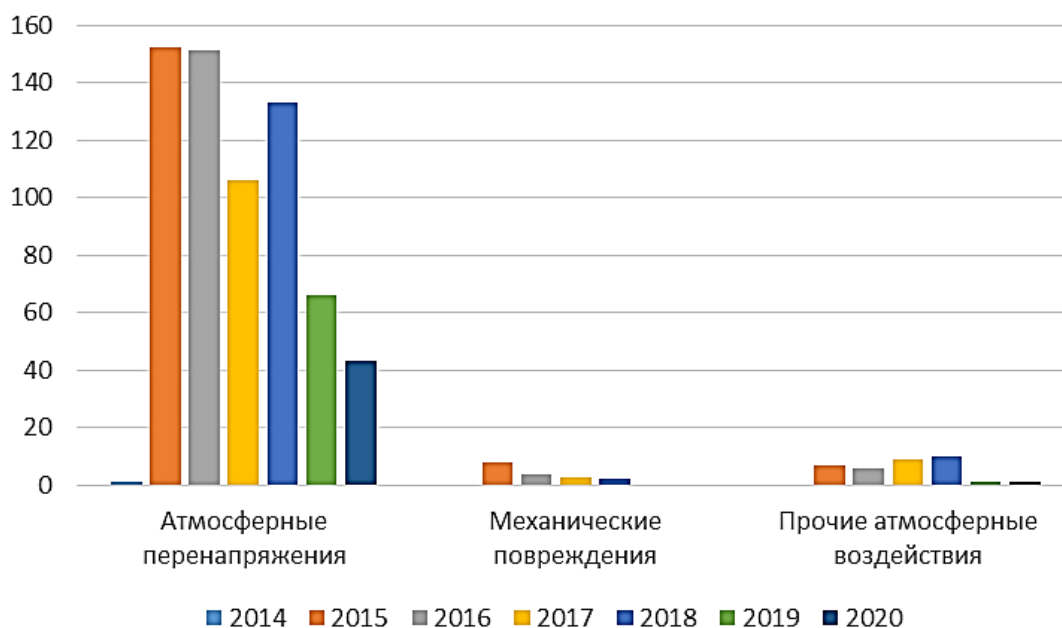


Рисунок 1.5 – Основные причины повреждений ВЛ 10-110 кВ, за 2014-2020 года

На рисунке 1.6 показаны причины повреждений разрядников 10 - 110 кВ за период 2014-2020 год.

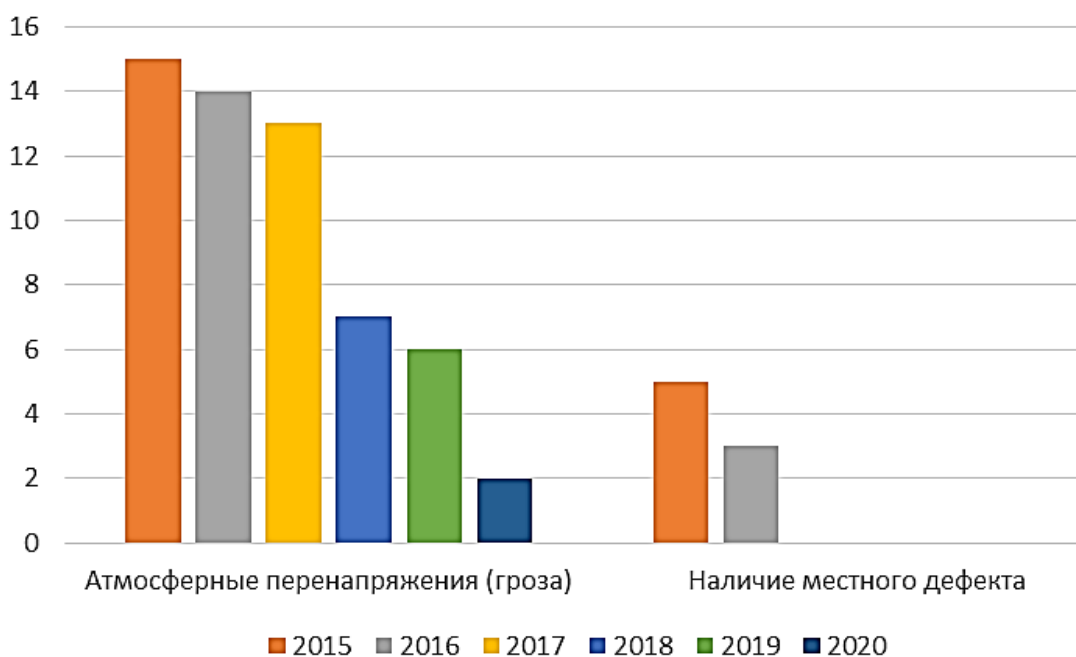


Рисунок 1.6 – Основные причины повреждений разрядников 10-110 кВ, за 2014-2020 года

На рисунке 1.7 приведено распределение количества отказов силовых трансформаторов и автотрансформаторов по различным причинам за 2014-2020 года обще количество отказов 36 раз.

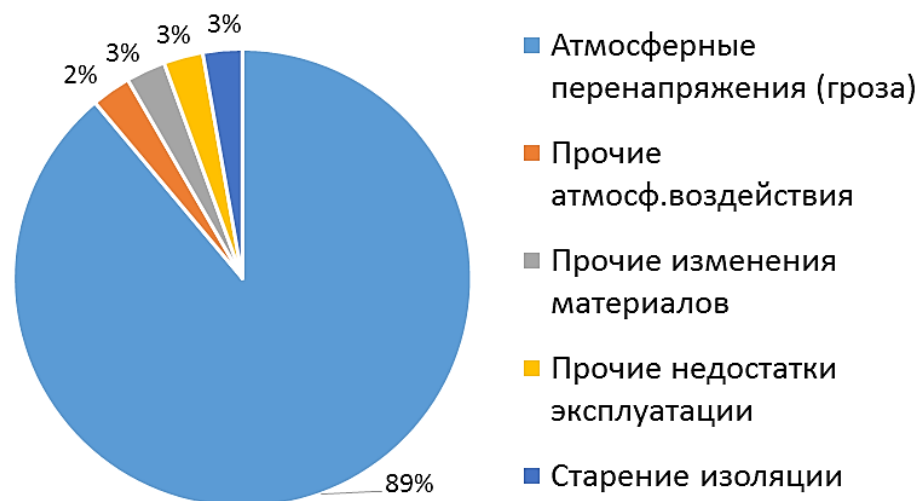


Рисунок 1.7 – Основные причины повреждений силовых трансформаторов и автотрансформаторов в сетях 6-110 кВ за 2014-2020 года

На представленных рисунках показаны лишь основное оборудование, повреждаемое грозовыми воздействиями. Всего же, в энергосетях Юга за 2014-2020 было зафиксировано более 965 случаев выхода из строя оборудования по причине «атмосферное перенапряжение (гроза)» из 1018, что составляет почти 95 % от общего числа повреждений.

Важно отметить, что выше показана статистика по регионам с развитой транспортной системой и с малым удельным сопротивлением грунта (от 10 – 1000 Ом). В регионах с высоким сопротивлением грунта (более 10 000 Ом) и слаборазвитой логистикой (регионы Крайнего Севера, горные районы) ситуация многократно хуже [20, 21].

Опыт эксплуатации подстанций 35-220 кВ, представленный в работах Халилова Ф.Х. (таблица 1.1) показывает, что набегающие грозовые волны являются существенным фактором, вызывающим повреждения оборудования на подстанциях [22], что также подтверждается работой по оценке основных причин сокращения срока службы трансформаторов [23]. Информация представлена по данным 54 энергосистем бывшего СССР и 24 энергосистемы РФ.



Таблица 1.1 – Число повреждений оборудования ПС по данным опыта эксплуатации и показатель надежности безаварийной работы единицы оборудования подстанций из-за грозовых перенапряжений, возникающих при ударах молнии в линии электропередачи на подходах к подстанциям

Класс напряжения, кВ	Объем информации, ПС*лет	Число повреждений оборудования ПС по данным опыта эксплуатации		
		I группа	II группа	Общее
35	74000	57	37	94
110	76500	44	25	69
150	2500	1	1	2
220	16000	6	4	10

В таблице подстанции разделены на 2 группы:

- группа I – ПС с нормальной изоляцией электрооборудования;
- группа II – ПС с ослабленной (в ряде случаев с дефектами) изоляцией электрооборудования.

Важно отметить, что значительное количество повреждений оборудования подстанций не связано с грозовыми воздействиями, а являются следствием недостатками профилактики и ремонтов, а также влиянием человеческого фактора. При этом количеством таких повреждений можно управлять организационно-техническими мероприятиями.

Однако грозовые повреждения могут происходить даже при соблюдении всех правил грозозащиты и полного соответствия их ПУЭ. Это связано в основном с недостаточной изученностью развития грозовых перенапряжений, влиянию на эти процессы различных параметров (например, характеристики заземляющих устройств подстанций и опор ВЛ при малых временах и больших импульсных токах) и сложностью оценки, прогнозирования влияния перенапряжений на элементы энергосистем.

Таким образом, можно считать, что атмосферные (грозовые) перенапряжения являются одним из основных факторов, оказывающих негативное влияние на силовые трансформаторы.

Среди отечественных специалистов, посвятивших свою работу защите оборудования подстанций от грозовых перенапряжений, следует выделить Костенко М.В., Ефимова Б.В., Гумерову Н.И., Халилова Ф.Х, Кадомскую К.П., Гайворонского А.С., Подпоркина Г.В.

Важно отметить, что проблема грозовых перенапряжений остро стоит не только для России, но и для многих других стран, таких как США, Бразилия, Китай, Япония, Индия, Греция, Азербайджан и т.д. В этих странах ведутся активные исследования, направленные на мониторинг грозовых воздействий на объекты энергетики [24-32], разработку моделей грозовых воздействий для исследований и разработок защитных средств и мероприятий [33] и непосредственная разработка средств и способов защиты от воздействия грозовых перенапряжений.

### 1.3 Типы грозовых перенапряжений

Частным видом внешних перенапряжений являются перенапряжения, возникающие при грозовых разрядах. В соответствии с [34], на рисунке 1.8 представлены основные случаи прямых ударов молнии в присоединенные к подстанциям ВЛ:

- удары молнии в фазные провода (точка 1);
- удары молнии в опоры (точка 2);
- удары молнии в трос (точка 3).

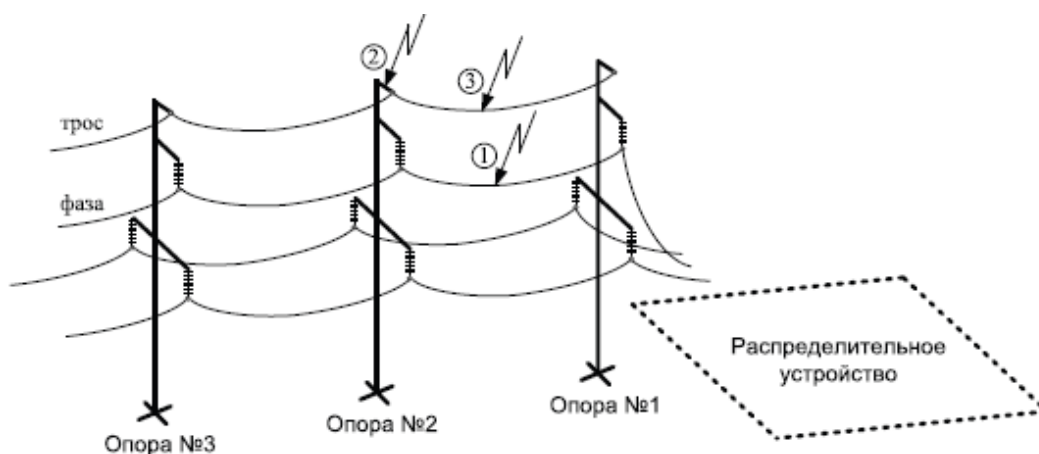


Рисунок 1.8 – Возможные места ударов молнии в воздушную линию

Условно грозовые волны перенапряжения, представленные на рисунке 1.9, в зависимости от их энергетического потенциала и крутизны можно разделить на три группы:

- полные волны, образованные в результате прорыва молнии сквозь тросовую защиту ВЛ и не приведшие к перекрытию линейной изоляции с амплитудой, не превышающей 50%-ное импульсное разрядное напряжение линейной изоляции ВЛ (а);
- срезанные волны, образованные в результате прорыва молнии сквозь тросовую защиту с последующим перекрытием линейной изоляции ВЛ (б);
- короткие волны, образованные при обратных перекрытиях с тела опоры на провод при ударах молнии в опору или грозозащитный трос (в).

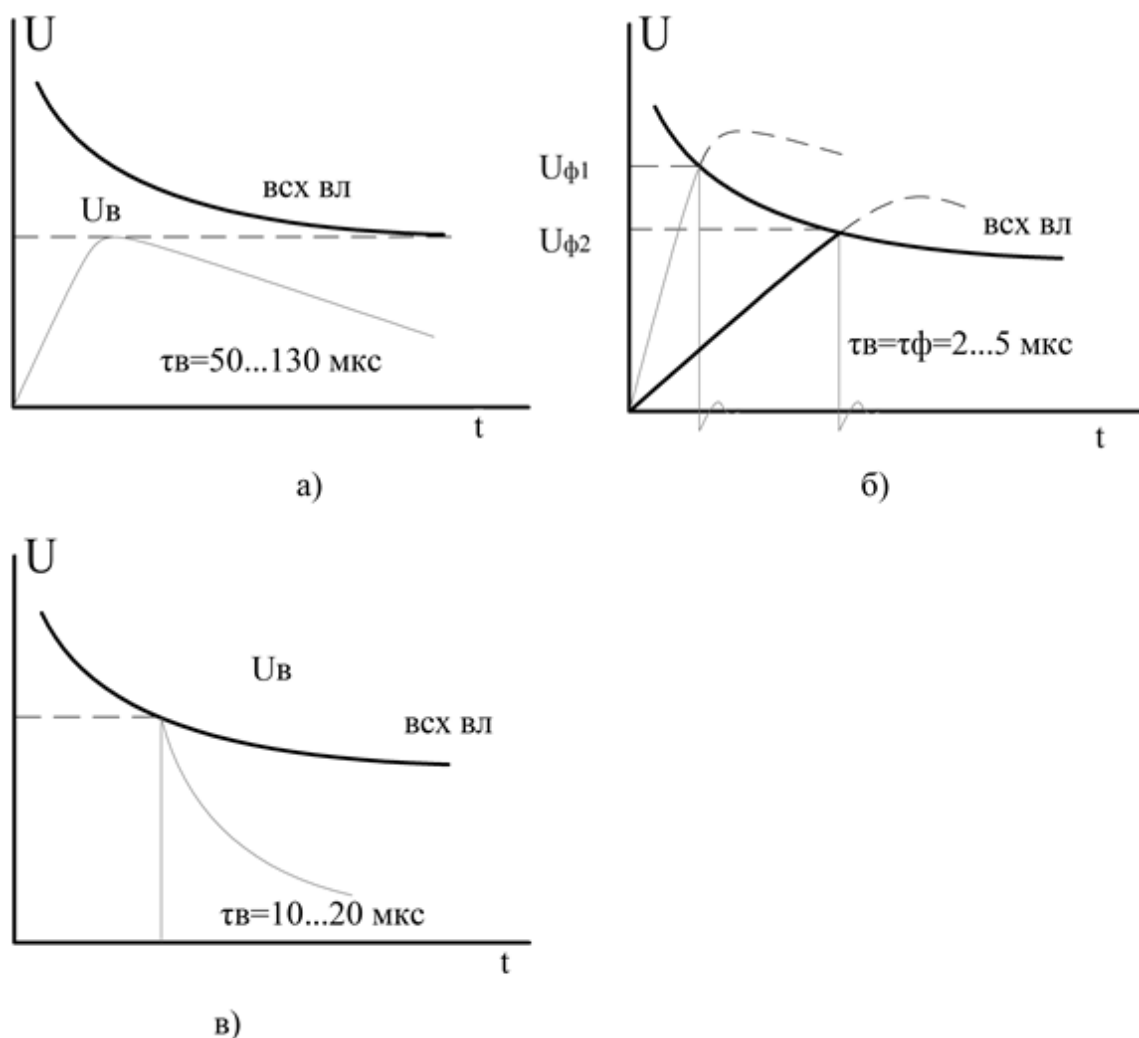


Рисунок 1.9 – Стилизованные кривые форм грозовых волн, набегающих на ПС при ударе молнии в провод (а, б) и опору или грозозащитный трос (в)

Наибольшую опасность для продольной изоляции трансформаторов представляют срезанные волны большой крутизны за счет мгновенного скачка напряжения на витках обмоток [2], при этом влияние могут оказывать как волны с большой амплитудой, так и с малой. Типичные формы срезанных импульсов представлены на рисунке 1.10.

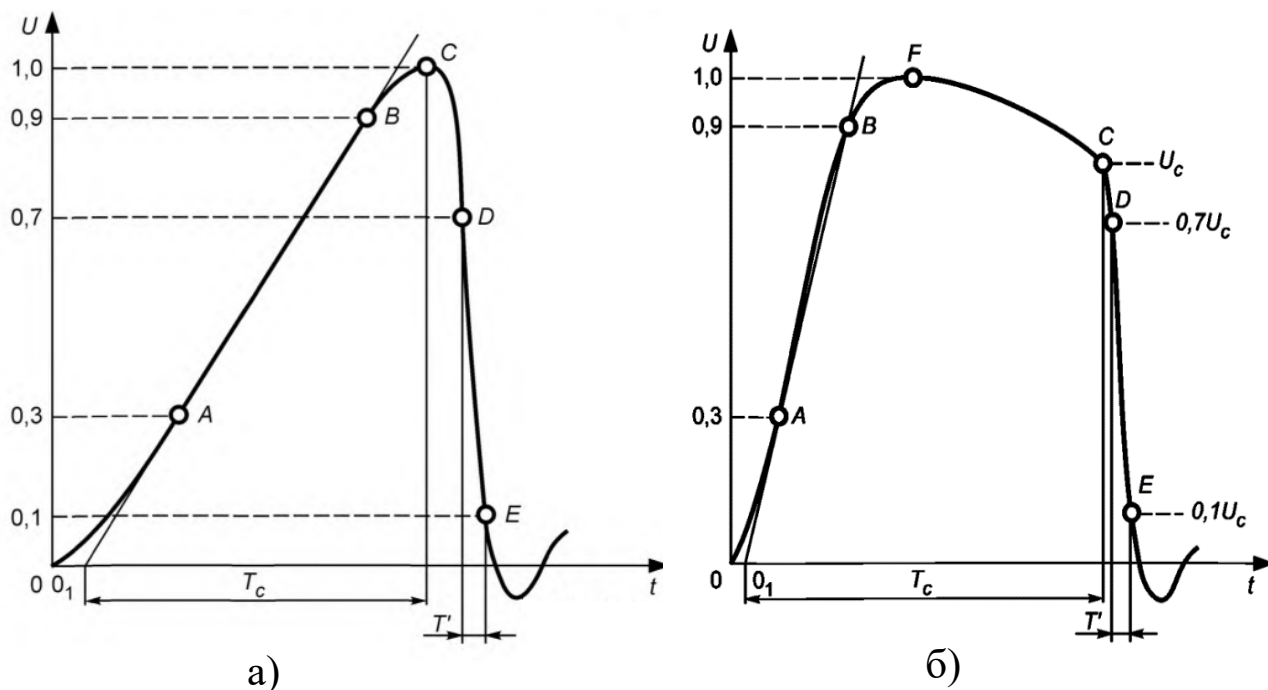


Рисунок 1.10 – Грозовые импульсы: а) импульс, срезанный на фронте; б) импульс, срезанный на спаде импульса

Момент среза импульса — момент времени начала резкого изменения формы импульса вследствие быстрого снижения напряжения (точка С на рисунке 1.10) [35]. Предразрядное время импульса  $T_c$  определяют как интервал времени между условным началом импульса  $0_1$  и моментом среза. Длительность среза импульса  $T_{д.с.}$  определяют, как время, превышающее в 1,67 раза интервал времени  $T'$  между моментами, когда напряжение на срезе составляет 70 % и 10 % значения напряжения в момент среза (точки D и E на рисунке 1.10).

В нормативных документах делается примечание, что при использовании обычных средств измерения длительность среза и его крутизна не могут быть определены с достаточной степенью точности. Несмотря на это можно попробовать оценить частоту получаемого импульса при различных значениях

времени  $T'$ . Однако даже приблизительные оценки крутизны, по формам сигналов, дают крутизну на порядок больше, чем ожидаемая по нормативным документам [20], что лишний раз говорит о высокой опасности крутых и срезанных волн.

Образующиеся импульсы перенапряжения могут существенно влиять на трансформаторное оборудование различных классов напряжений (10-220 кВ) [36, 37]. При этом при отсутствии защитных устройств, наибольшему воздействию подвергается силовые трансформаторы, а именно концевые витки обмотки трансформаторов. Из-за высокой крутизны набегающего импульса в начальные моменты времени все напряжение концентрируется на нескольких первых витках, что показано на рисунке 1.11 [38] и нашло отражение в работе [39].

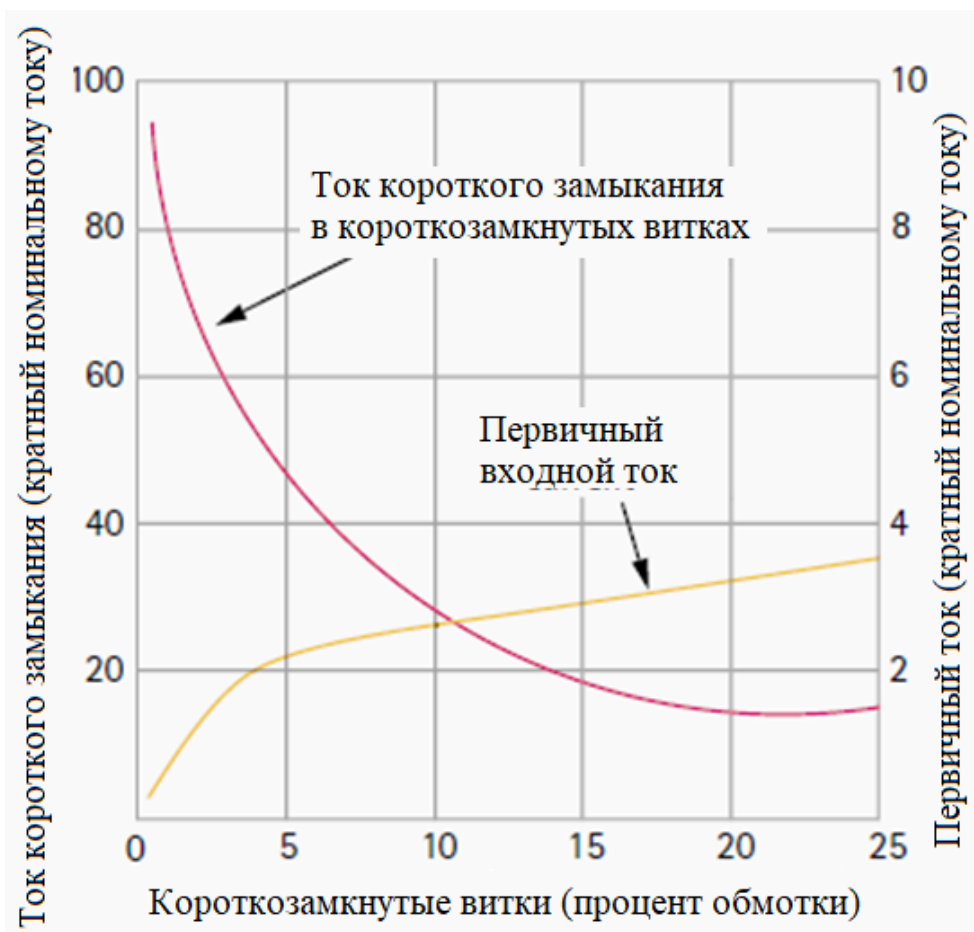


Рисунок 1.11 – Ток межвиткового короткого замыкания в зависимости от количества короткозамкнутых витков [38]

Несмотря на то, что межвитковая изоляция концевых витков усилена, она не может быть значительно больше изоляции относительно корпуса (земли). Поэтому

могут происходить частичные пробой изоляции обмоток. Дальнейшее воздействие импульсов способствует развитию дефекта и при этом, если он не обнаруживается в начальные стадии, в дальнейшем определение причины может быть затруднено.

Важно отметить, что кроме грозových перенапряжений, такие последствия для трансформаторов могут быть инициированы также и коммутационными перенапряжениями, например, при работе выключателей на подстанциях. При этом частотный диапазон, повышается до 1–2 МГц, в отличии от 200–300 кГц, при грозových перенапряжениях. Кроме того, они могут вызывать различные резонансные эффекты, затрагивающие как первичные, так и вторичные обмотки трансформаторов [40-42].

Следует отметить, что опасность могут представлять не только прямые удары в воздушные линии и подстанции, но и наведенные перенапряжения, от ударов молний рядом с объектами энергетики [43, 44]. Еще одной важной деталью является влияние повторных ударов молний [45].

#### **1.4 Влияние высокочастотных коммутационных перенапряжений**

Как уже отмечалось ранее важным источников высокочастотных перенапряжений являются коммутационные перенапряжения, которые могут возникать при внезапных изменениях в схеме или параметров сети, работе выключателей (особенно вакуумных) замыканий на землю и между фазами, коммутации кабельных и воздушных линий и т.д. [46-49]. При этом возникающие колебательные процессы характеризуются частотами, значительно превышающими диапазон грозových перенапряжений и достигать 1-2 МГц. Особенно актуально это становится при срабатывании вакуумных выключателей на подстанциях, так, например, эта проблема нашла отражение в работе [50] в таблице 1.2 приведены примеры случаев и параметры выхода из строя трансформаторов из-за воздействия коммутационных перенапряжений.

Таблица 1.2 – История отказов трансформаторов, связанных с переключением первичного вакуумного выключателя [50]

№	Объект	Напряжени е, кВ	Трансформатор			Вакуумный выключатель
			Тип	Разряд ник	Вышедший виток	Положение
1	ГЭС	13,80	Сухой	Нет	1-ый виток	Закрит
2	Больница	13,80	Сухой	Нет	1-ый виток	Закрит
3	Железная дорога	26,40	Маслонапол ненный	Нет	Средний виток	Открыт
4	Дата-центр	26,40	Литой	Да	1-ый виток	Закрит/открыт
			Литой	Да	не обнаружено	Закрит
5	Нефтяное месторожде ние	33,00	Сухой	Нет	1-ый виток	Закрит
6	Нефтяная буровая вышка	11,00	Литой	Да	1-ый виток	Закрит

На рисунке 1.12 показаны типичные последствия коммутационных перенапряжений повлекших выход трансформаторов из строя.

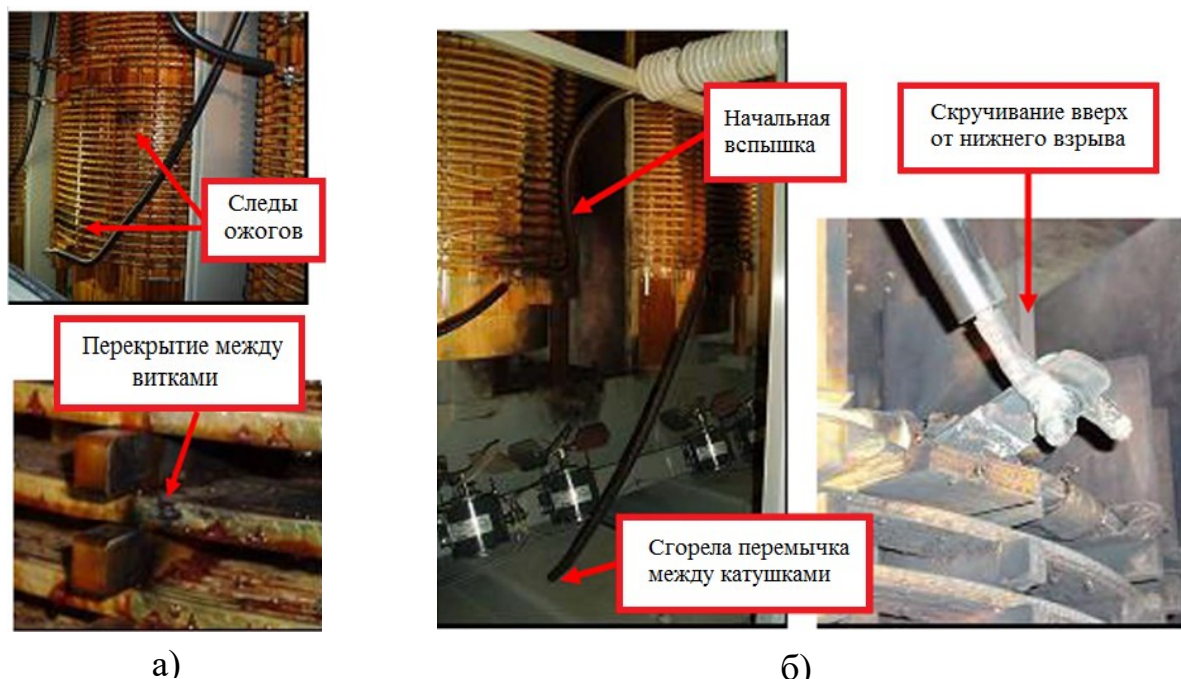


Рисунок 1.12 – Последствия воздействия коммутационных перенапряжений при срабатывании вакуумных выключателей: а) при отключении; б) при включении

Такие перенапряжения могут возникать в сетях различной конфигурацией, и могут быть опасными не только для трансформаторного, но и иного оборудования (двигателя, генераторы и т.д.) [51, 52]. При этом основными средствами защиты от них предлагается использовать ОПН, которые имеют ряд недостатков, не позволяющих надёжно защищать оборудование от воздействия коммутационных перенапряжений.

## 1.5 Защита от перенапряжений

### 1.5.1 Классические средства защиты

Для защиты воздушных линий и подстанций от повреждений при разрядах молний, служат специальные устройства грозозащиты, к которым относятся грозозащитные тросы, стержневые молниеотводы, трубчатые разрядники, вентильные разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений, устройства заземления и т.д.

Существенную роль оказывает значения сопротивления **заземление опор** [53, 54]. Строго говоря, заземление опор воздушных линий, не является непосредственно мероприятием по защите от грозовых перенапряжений. Однако, несмотря на это, оно оказывает существенное влияние на защиту от грозовых перенапряжений. Оно оказывает существенное влияние на вероятность обратных перекрытий с опоры/троса грозозащиты на фазный провод [55]. При обратном перекрытии возникают импульсы высокочастотных перенапряжений, которые не могут подавляться защитными устройствами. Соответственно, они оказывают существенное влияние на оборудование подстанций, например, трансформаторы, и могут оказывать влияние на другое оборудование (это полиэтиленовые кабели, высоковольтные вводы с RIP-изоляцией, подвесные изоляторы и т.д.) [56].

Часто реальное сопротивление заземления опор, намного больше требуемых по нормативной документации [57-59]. Это особенно актуально для районов с высоким удельным сопротивлением грунта [60], таких как степи, полупустыни, районы с вечной мерзлотой, горные и скалистые районы. В работе [61] отмечено, что проблема качественного заземления возникает при наличии значительных



перепадов высот, что требует применения новых и не апробированных еще методик расчета заземления. В этих районах очень сложно обеспечить требуемые значения сопротивления заземления опор воздушных линий. В связи с этим сильно возрастает вероятность возникновения обратных перекрытий [62], что отрицательно сказывается на общем показателе грозоупорности.

При этом важной характеристикой становится не только активное сопротивление заземления, но и индуктивные характеристики заземления, которые при неблагоприятных условиях (сложность конструкции, высокие напряженности электрического поля и другие) могут значительно (на 40 %) увеличить напряженности электрического поля на элементах [63-67].

Исследования показывают, что при грозовых и импульсных воздействиях сопротивления заземления опор отличаются от сопротивлений, измеренных на рабочей частоте 50 Гц [25, 68]. На характеристики заземления опор начинают влиять и реактивные элементы как заземлителя, так и опоры, что в сумме с индуктивностью опор существенно меняет форму простого апериодического импульса напряжения, воздействующего на изоляцию ВЛ. При достаточно крутом импульсе, его амплитуда практически не будет зависеть от сопротивления заземления, и будет определяться индуктивностью опоры [69]. Это оказывает значительное влияние на вероятность обратных перекрытий при ударах молнии в опоры или трос грозозащиты для классов напряжения 35-330 кВ.

Стоит отметить, что и другие показатели, косвенно влияющие на сопротивление грунта, например, диэлектрическая проницаемость, также могут оказывать существенное влияние на характеристики заземления [63, 70]. Или, например, наличие перепадов высот в пределах заземляющего устройства [61].

Эти показатели мало изучены, однако учет их необходим для обеспечения надежных систем заземления, позволяющих защищать оборудование подстанций от грозовых перенапряжений.

**Грозозащитный трос** подвешивается на линиях напряжением 110 кВ и выше, сооруженных на металлических и железобетонных опорах. На линиях 110 - 220 кВ с деревянными опорами и линиях 35 кВ трос подвешивается обычно только

на подходах к подстанциям [71]. Несмотря на широкое применение тросов в качестве средства защиты, часто имеют место случаи ударов молнии в фазные провода минуя трос грозозащиты, что снижает его надежность как средства защиты, кроме того, без хорошего заземления, существует большая вероятность обратного перекрытия на фазный провод, что также является опасным фактором. При этом и тросовые молниеотводы, также не обеспечивают декларируемую надежность защиты от поражения молнией [72].

В России, а также странах СНГ для защиты ВЛ 110-500 кВ от грозовых наиболее распространенным методом защиты является применение **линейных защитных аппаратов**. Наиболее распространенными защитными аппаратами являются подвесные **нелинейные ограничители перенапряжений** и **линейные разрядники** [3]. Стоит заметить, что в настоящее время, нет разработанной и утвержденной универсальной методики применения линейных защитных аппаратов для ВЛ различных классов напряжения. Поэтому эксплуатационные организации, которым принадлежат ВЛ (МЭС, Энергосистемы), испытывают определенные затруднения в разработке технических мероприятий по защите проблемных ВЛ [73, 74]. Ограничители перенапряжений устанавливаются в основном в сетях 110 кВ и выше, однако могут и применяться в сетях 35 кВ [1].

ОПН позволяет глубоко ограничивать амплитуды набегающих импульсов и обеспечивать защиты от перенапряжений [4-6, 75, 76]. Однако, ОПН имеют ряд существенных недостатков. В первую очередь, эффективная работа ОПН, обеспечивается лишь при установке одновременно во все фазы защищаемой цепи на каждой опоре защищаемого участка трассы [7, 8]. Это очень дорогостоящее мероприятие, и оно применимо только для относительно коротких или особо важных воздушных линий. В остальных случаях или применяется метод поочередной установки [77] или устанавливается на определенных участках, особо подверженных воздействию ударам молний [78, 79].

Отсутствие искровых промежутков обуславливает протекание через ОПН токов рабочего напряжения сети частотой 50 Гц. При большом значении этих токов может произойти перегрев варистора и выход ОПН из строя. К тому же ток,

протекающий через ограничитель в нормальном режиме, содержит емкостную и активную составляющие. При напряжениях до  $0,7U$ , преобладает емкостная составляющая тока. При больших напряжениях резко возрастает нелинейная проводимость и активная составляющая тока, что так же приводит к значительному нагреву варистора.

Существенным недостатком ОПН является и зависимость конструкции от класса напряжения и характеристик сети. Наибольшие сложности возникают при разработке ОПН для распределительных сетей, имеющих большую протяженность. Это приводит к тому, что для безаварийной эксплуатации ОПН необходим точный выбор его параметров. Основными факторами, являющимися необходимыми при выборе ОПН являются [80, 81]:

- максимально допустимое напряжение с учетом длительности его воздействия;
- расчетный импульсный ток;
- расчетный коммутационный ток;
- энергоемкость (класс пропускной способности).

В ряде случаев последние два параметра заменяются способностью поглощать электрическую энергию, выраженной в кДж на 1 кВ  $U_m$ .

Важно отметить, что ОПН не могут повлиять на крутизну фронта воздействующих грозовых перенапряжений, они ограничивают лишь амплитуду перенапряжений, зависящей от остающегося напряжения на защитном аппарате. Причем в некоторых случаях срабатывание ОПН может повлечь за собой повышения крутизны набегающей волны за счёт превращения волны в волну с крутым фронтом [10]. Если значения перенапряжений меньше расчетного уровня защиты, максимальные значения набегающих перенапряжений не изменяются. Перенапряжения с малыми максимальными значениями достигают трансформаторов практически без амплитудных искажений и становятся источниками перенапряжений с большими максимальными значениями крутизны, возникающими внутри обмоток вследствие эффекта резонансных явлений [82]. Таким образом, если, например, рассматривать силовые трансформаторы, то ОПН

снижают уровень грозových перенапряжений, воздействующих на главную изоляцию (между обмоткой высокого напряжения и заземленным баком), но не снижают градиентные перенапряжения, воздействующие на межвитковую изоляцию трансформаторов. При этом ситуация многократно ухудшается в условиях высокого сопротивления грунта.

Также следует отметить неэффективность ограничения высокочастотных (ВЧ) перенапряжений с помощью ОПН, которая обусловлена наличием индуктивности собственно защитного аппарата и его присоединений. Ограничитель перенапряжения следует рассматривать как средство ограничения ВЧ перенапряжений, если частота последних не превышает 200 кГц. При более высоких частотах ОПН слабо реагирует на первый, как правило, максимальный пик ВЧ перенапряжений, но ограничивает последующие. Все это сужает область применения ОПН для защиты оборудования подстанций.

Кроме того, эксплуатация ОПН показала малую эффективность в сетях среднего напряжения при защите от индуцированных перенапряжений [83]. В работе [84] выявлена существенная зависимость эффективности защиты трансформаторов в сетях 11 и 33 кВ, от длины провода присоединения ОПН, что также накладывает некоторые ограничения в использовании данных устройств, как средств защиты.

Можно также добавить, что некоторые исследования говорят о возможности снижения общей надежности подстанции, вне грозового периода, при наличии ОПН [2]. Это также заставляет оценивать эффективность и риски использования ОПН, а также заставляет проводить численные оценки для уточнения необходимого количества ОПН на подстанции.

Кроме того, в работах [3] [8, 9, 85-88] показано, что даже при выполнении требований ПУЭ [89] к размещению защитных аппаратов и применению ОПН, возможно появление опасных грозových перенапряжений от волн, набегающих по ВЛ.

### **1.5.2 Разрабатываемые, перспективные и инновационные средства защиты от высокочастотных перенапряжений**

Кроме распространенных средств защиты от перенапряжений, активно ведутся разработки и внедрение новых устройств, работающих на различных принципах: совместное применение воздушного зазора и линейных разрядников [90], применение ОПН с комплексом резисторов и конденсаторов [91, 92]. Однако, зачастую устройства сохраняют недостатки своих прототипов, в основном это: необходимость большого числа устройств (от одного до трех на каждую опору в одноцепной воздушной линии), зависимость от заземления грунта, сложность в установке и эксплуатации [93]. Другие же способы подавления перенапряжений не были проверены, т.к. были проведены компьютерные симуляции, но в массовое использование так и не пошли, например, применение ферромагнитных колец [94].

В патенте [93] предлагается использовать одновременно ОПН с установленным на него разрядными промежутками. Предполагается использовать одновременно защитные свойства как ОПН, так и разрядных промежутков, для нивелирования недостатков. Однако у данного предложения есть ряд недостатков, таких как необходимость точной настройки размера разрядного промежутка, ограничение по минимальной амплитуде срабатывания.

Существует решения, заключающиеся в применении нелинейных ограничителей перенапряжения встроенных в корпуса изоляторов (патенты [95, 96]). Данные решения позволяют значительно сократить трудозатраты на транспортировку, установку и монтаж, так как вместо двух устройств, будет использоваться одно. Однако это приводит к усложнению конструкции самого устройства, снижению его надежности, увеличению габаритов и веса. Также остается актуальной типичная проблема устройств с варисторами: сложность контроля его исправности.

В работах [97, 98] Предложена концепция защитных устройств, параметры которых меняются в зависимости от частотной характеристики набегающего перенапряжения. Так предлагается применения комбинация высокочастотного магнитного материала, расположенная на основном проводнике, с параллельно

подключенным сопротивлением. По представленным расчётам и экспериментам, такая комбинация способна подавлять и защищать от высокочастотных перенапряжений, данное устройство предназначается для подавления перенапряжений с высокими показателями  $dU/dt$ , то есть с высокой крутизной. Однако устройство требует настройки под определённый диапазон частот, в котором будет достигаться эффективное подавление. Следует отметить, что в данных статьях показывается проблема защиты трансформаторов от высокочастотных перенапряжений, вызванных коммутационными операциями, а именно работой вакуумных выключателей.

Одной из последних разработок являются системы, состоящие из мультикамерных разрядников. Они показывают высокую эффективность, что подтверждает ряд работ [99], в особенности, эффективно они снижают количество отключений ВЛ. Однако несмотря на высокую заявленную эффективность, эти устройства также имеют ряд существенных недостатков: для обеспечения надёжной защиты от грозовых перенапряжений необходима установка разрядников на каждой опоре на каждый изолятор, необходима точная настройка искрового промежутка (если устройство используется с ним), а также необходимость надёжного заземления для обеспечения эффективной работы [100]. Следует отметить, что автором не было найдено данных об опыте эксплуатации разрядников в условиях Крайнего Севера. Это важно, потому что нет информации о том, как на эффективность мультикамерных разрядников влияет большое сопротивление заземляющих устройств, а также влажность и наледь.

### **1.5.3 Применение скин-эффекта в защите от высокочастотных перенапряжений**

Наиболее перспективным с точки зрения простоты эксплуатации и применения видится использование защитных устройств, основанных на применении композитных материалов (проводник-диэлектрик, проводник-ферромагнетик и. т.д.) [12-16]. Существуют и другие единичные разработки защитных устройств на принципе скин-эффекта [17].

Эти устройства могут эффективно подавлять высокочастотные перенапряжения, при этом быть достаточно компактными и на их работу не влияет значения сопротивления грунта или заземления опор.

Принцип их работы заключается в повышении сопротивления устройства при увеличении частоты входящего сигнала. На рисунке 1.13 представлены принципиальные схемы подключения защитных устройств: нелинейного ограничителя перенапряжений и частотнозависимого устройства (ЧЗУ).

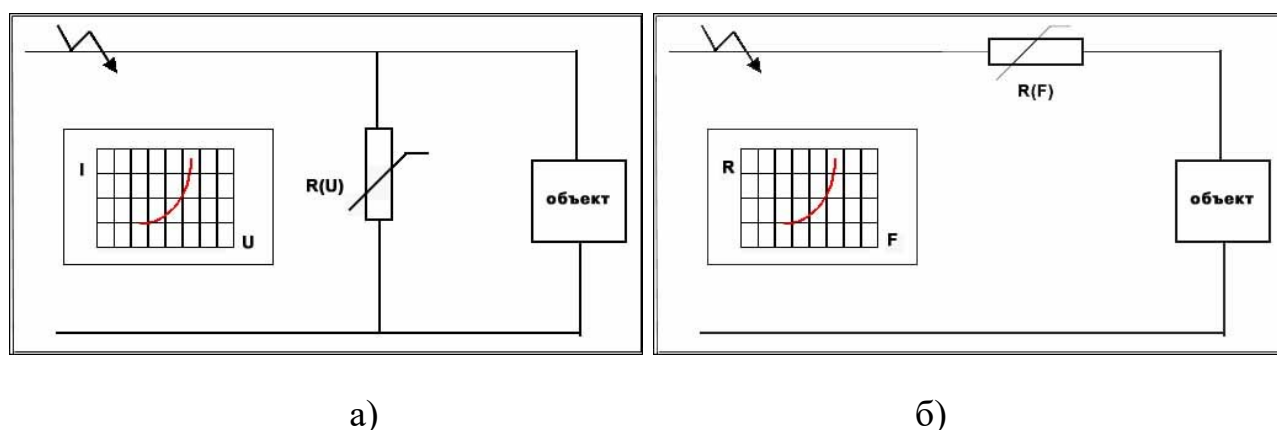


Рисунок 1.13 – Схемы защиты объекта с помощью: а – ОПН; б – ЧЗУ

Одним из перспективных ферромагнитных материалов является ленты 5БДСР. Этот материал имеет высокое удельное сопротивление в диапазоне грозových (200-300 кГц) и коммутационных частот (1-2 МГц) [101, 102]. Применение этого материала эффективно себя показало в ранних исследованиях [103]. На его основе было создано частотнозависимое устройство (ЧЗУ) для ВЛ 110 кВ, показанное на рисунке 1.14. Три экземпляра ЧЗУ находились в опытной эксплуатации на ПС Сугмутская АО Россети-Тюмень [104].

Разработанное частотнозависимое устройство, представляет собой смотанный в катушку фазный алюминиевый провод с нанесенным на него ферромагнитным материалом, который обладает высокой магнитной проницаемостью и высоким удельным сопротивлением. В связи с этим сопротивление провода приобретает частотнозависимый характер и при прохождении высокочастотных сигналов по проводу его сопротивление резко возрастает.



Рисунок 1.14 – Фото ЧЗУ в высоковольтном зале СибНИИЭ

В нормальном режиме работы, на частоте 50 Гц, частотнозависимый провод имеет сопротивление равное сопротивлению фазного провода без покрытий, так как ток идет по алюминиевому проводнику, имеющему низкое удельное сопротивление. При прохождении высокочастотного сигнала (например, грозового импульса перенапряжения, имеющего частоту 200-300 кГц), сопротивление провода, и соответственно устройства резко возрастает в десятки тысяч раз, за счет действия скин-эффекта и выталкивания тока из алюминиевого проводника в высокоомный слой ферромагнитного материала, что показано на рисунке 1.15.

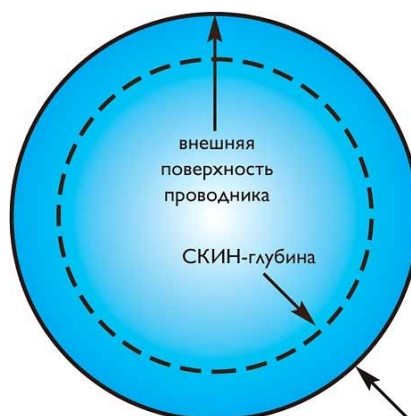


Рисунок 1.15 – Иллюстрация работы скин-эффекта



При длине провода 120 метров используемого в ЧЗУ, обеспечивается сопротивление 120 Ом на грозовых частотах (для сравнения сопротивление провода без ферромагнитной ленты при той же длине составляет около 20 мОм), что позволяет значительно снижать амплитуду импульсов высокочастотных перенапряжений. В свою очередь форма устройства в виде спирали создает высокое реактивное сопротивление, которое существенно снижает крутизну набегающего импульса, уменьшая тем самым опасность межвитковых замыканий в защищаемом оборудовании, в первую очередь в силовых трансформаторах. Как результат, работа данного устройства позволяет существенно увеличить грозоупорность ВЛ и подстанций.

В качестве ферромагнитного материала использовалась лента холоднокатаной аморфной кристаллической стали 5БДСР, параметры которой представлены в таблице 1.3 [105]:

Таблица 1.3 – Основные характеристики ленты 5БДСР

Свойства	Значения
Температура Кюри $T_k$ , °С	350
Температура начала кристаллизации $T_C$ , °С	530
Плотность, $g/cm^3$	7,6
Удельное электрическое сопротивление, $\mu\Omega \times m$	1,6
Константа магнитострикции, ppm	2,1
Максимальная температура постоянного использования, °С	240
Индукция насыщения $B_s$ , Т	1,30

Несмотря на высокую эффективность устройства, показанную в лабораторных условиях, следует отметить и ряд моментов, не позволяющих быстрому выходу в широкую эксплуатацию этих устройств: недостаточное количество информации по эффективности подавления устройством высокочастотных перенапряжений (нет анализа данных по успешности опытной эксплуатации, не проводились оценки по эффективности подавления импульсов обратного перекрытия и срезанных импульсов высокочастотных перенапряжений), недостаточно высокое омическое сопротивление на высоких частотах, большие

габариты, а также отсутствие устройств на другие классы напряжений (например, 35 кВ).

В связи с этим необходимо провести оценку эффективности опытной эксплуатации ЧЗУ, рассмотреть возможности повышения активного сопротивления ЧЗУ и оценить возможности оптимизации конструкций ЧЗУ.

### **Выводы по Главе 1**

На основании проведенного обзора источников можно сделать следующие выводы:

1) защита оборудования подстанций от высокочастотных перенапряжений грозовой и коммутационной природы является актуальной проблемой;

2) одним из важных источников опасности данных перенапряжений является высокая крутизна набегающего импульса, которая не зависит от амплитуды и может вызывать повреждение изоляции обмоток трансформатора;

3) основное направление современных средств защиты - снижение амплитуды набегающего импульса и снижение количества аварийных выключений ВЛ. При этом мало внимания уделяется уменьшению крутизны импульсов.

## ГЛАВА 2 НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Испытания на переменном напряжении

#### 2.1.1 Экспериментальная установка и методика измерений

Для проведения низковольтных измерений на переменном напряжении применялась схема, показанная на рисунке 2.2а. Схема измерения состояла из генератора высокочастотных сигналов, измеряемого макета, малоиндуктивного шунта (в качестве шунтов применялись одиночные резисторы ТВО или спаянные наборы сопротивлений, конечным номиналом 3, 1, 0,5, 0,1 Ом) и осциллографа. Макеты и шунт располагались в заземленном металлическом измерительном шкафу, для исключения влияния внешних помех. Генератор сигналов и осциллограф находились снаружи, соединение с макетом производилось с использованием разъемов, смонтированных на стенке шкафа. Для измерений применялся двухканальный осциллограф DS1022C, а в качестве источника высокочастотных сигналов применялся генератор SFG-2010.

При измерениях определялись среднеквадратичные амплитуды сигналов, проходящих через шунт и макеты ( $K_1$  и  $K_2$ ), а также смещение фаз между амплитудами сигналов относительно друг друга (рисунки 2.1 и 2.3).

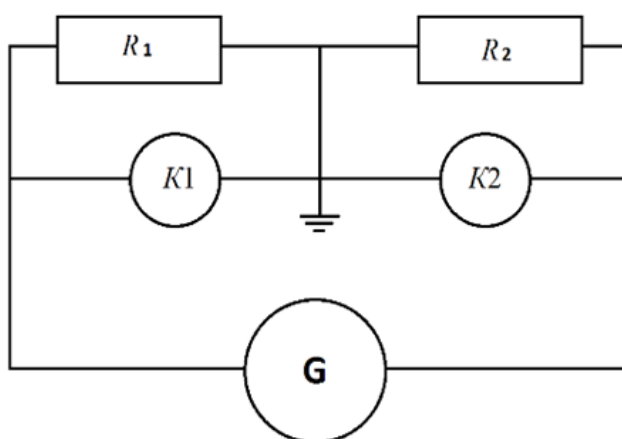
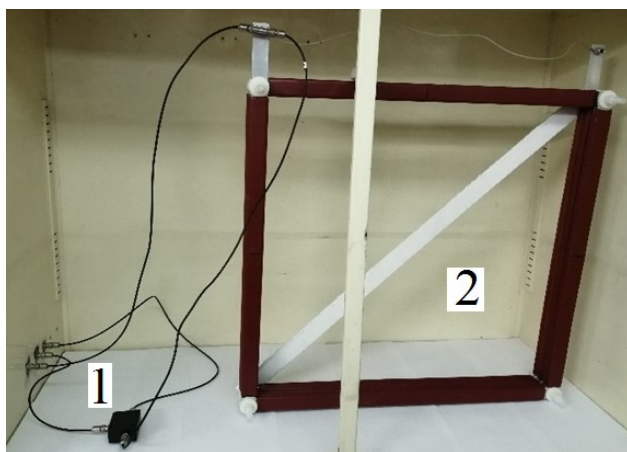
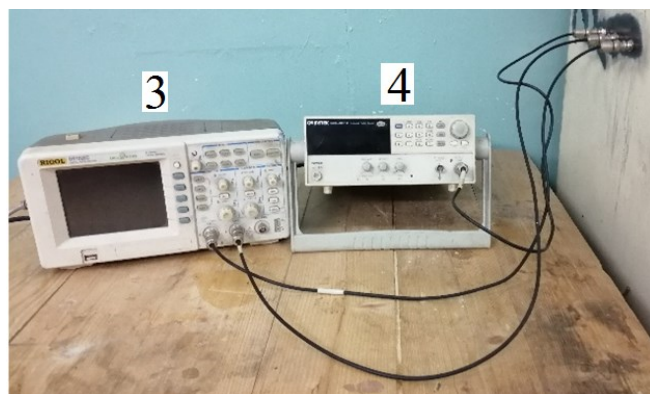


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема измерительной установки ( $R_1$ ,  $R_2$ , – малоиндуктивный шунт и измеряемый макет,  $K_1$ ,  $K_2$  – щупы осциллографа,  $G$  – генератор высокочастотного сигнала)



а)



б)

Рисунок 2.2 – Измерительная установка: а – измерительная установка в измерительном шкафу; б - измерительная установка снаружи шкафа. Здесь: 1 – малоиндуктивный шунт; 2 – макет ЧЗУ; 3 – осциллограф DS11022C; 4 – генератор сигналов SFG 2010

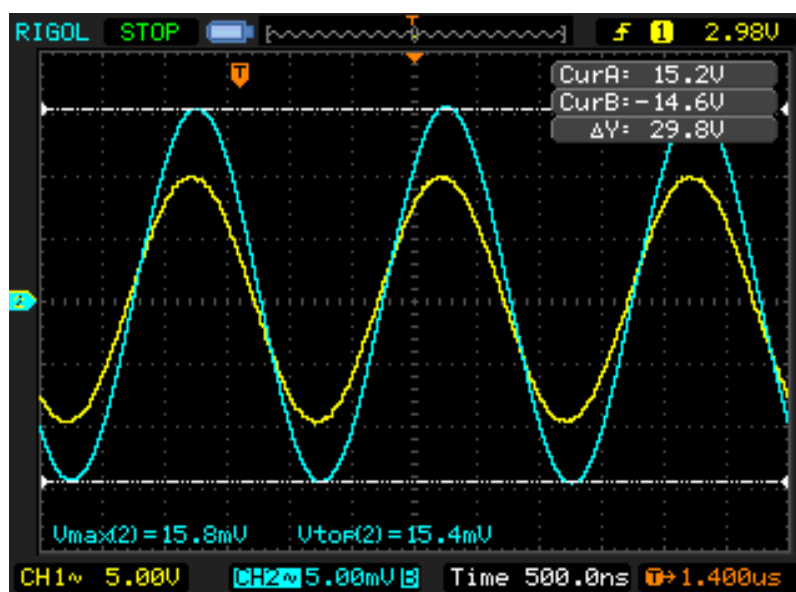


Рисунок 2.3 – Пример полученной осциллограммы

Измерения проводились в диапазоне частот от 100 кГц до 1 МГц, с шагом 100 кГц. Полученные данные фиксировались в журнале эксперимента. По полученным данным определялось полное сопротивление образца из следующего выражения:

$$Z_i = \frac{U_M}{U_{\text{ш}}} R_{\text{ш}} \quad (2.1)$$

где:  $Z_i$  – полное сопротивление макета на данной частоте, Ом;

$U_m$  – напряжение на макете, В;

$U_{ш}$  – напряжение на шунте, В;

$R_{ш}$  – сопротивление шунта, Ом.

Далее вычислялось реактивное  $X$  и активное  $R$  сопротивление макета. Для этого измерялось смещение фаз  $\tau$  и рассчитывались сопротивления по выражениям:

$$X_i = Z_i \sin \frac{\tau_i}{T_i} 360 \quad (2.2)$$

$$R_i = Z_i \cos \frac{\tau_i}{T_i} 360 \quad (2.3)$$

где:  $\tau_i$  – смещение фаз на данной частоте между колебаниями на шунте и макете, мкс;

$T_i$  – период колебаний на данной частоте, мкс.

### 2.1.2 Эксперименты с изменением конфигурации проводников

Первым шагом была попытка усовершенствовать уже имеющийся провод ЧЗУ, то есть увеличить его активное сопротивление путем намотки медной проволоки на проводник ЧЗУ. Идея заключалась в создании с помощью намотки магнитного поля, которое должно усиливать скин-эффект за счет вдавливания тока внутрь ленты 5БДСР. В качестве проводника был использован алюминиевый провод А-150, длиной 3 метра с нанесенной на него ферромагнитной лентой 5БДСР, намотка производилась медной проволокой диаметром 1 мм [106].

Низковольтные исследования проводились с различными проводниками: провод с лентой 5БДСР с намоткой из медной проволоки, провод с лентой без намотки, провод без ленты и без намотки. На графиках представлены изменения полного, активного и реактивного сопротивления образцов, при повышении частоты входного сигнала (рисунок 2.4).

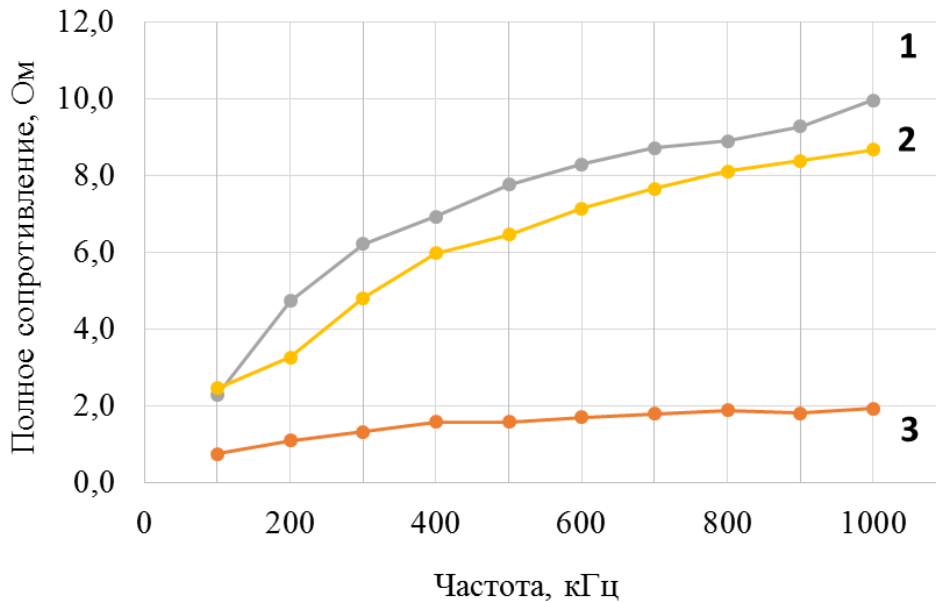


Рисунок 2.4 – Зависимость полного сопротивления ЧЗУ от частоты: 1 – провод с лентой 5БДСР; 2 – провод с лентой 5БДСР и с намоткой медной проволоки; 3 – провод без ленты 5БДСР

Из графиков видно, что полное сопротивление у образца с намоткой (2) не возросло, по сравнению с проводом без намотки (1). Также для сравнения представлены графики реактивного (рисунок 2.5) и активного сопротивлений образцов (рисунок 2.6).

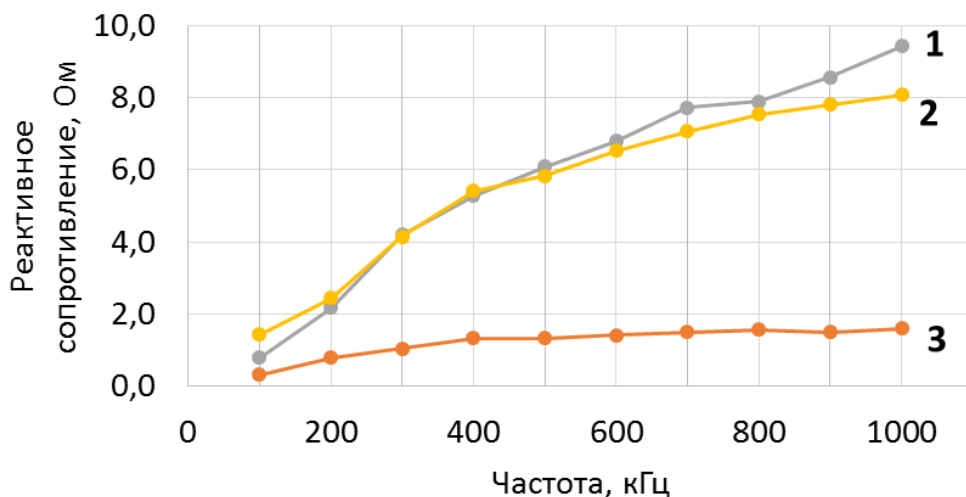


Рисунок 2.5 – Зависимость реактивного сопротивления от частоты: 1 – провод с лентой 5БДСР; 2 – провод с лентой 5БДСР и с намоткой медной проволоки; 3 – провод без ленты 5БДСР

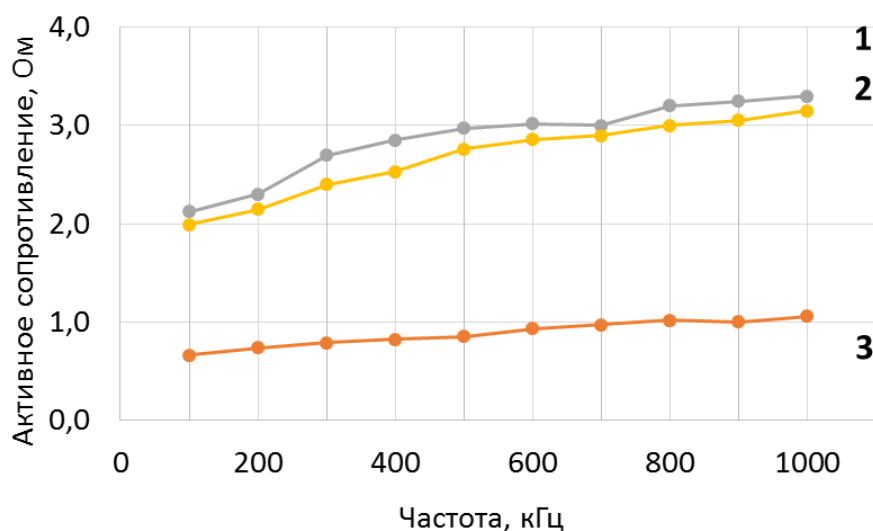


Рисунок 2.6 – Зависимость активного сопротивления от частоты: 1 – провод с лентой 5БДСР; 2 – провод с лентой 5БДСР и с намоткой медной проволоки; 3 – провод без ленты 5БДСР

Как видно из рисунков 2.5-2.6 у образца провода с намоткой проволоки не наблюдается роста активного или реактивного сопротивления. Различия между графиками образцов с намоткой и без намотки можно объяснить погрешностью измерений. Также возможно из-за наличия изоляции между проводом с лентой и намоткой, медная намотка показала себя как параллельно включенная с проводом катушка. В результате можно сделать вывод, что добавочная намотка провода с лентой 5БДСР не приносит увеличения сопротивления.

Параллельно были проведены эксперименты по оценке эффективности круглых частотнозависимых проводников различной конструкции. Были изготовлены 4 образца токопроводящего провода из алюминия (рисунок 2.7). Образцы проводов помещались в мелкодисперсный ферромагнитный порошок и плотно утрамбовывались. Образцы длиной 240 мм и площадью сечения 300 мм<sup>2</sup> представляли собой провода:

- витой провод (рисунок 2.7 (1)) имитирующий фазные провода;
- алюминиевый стержень с вырезанными бороздами глубиной 2 мм и шириной 1 мм параллельные течению тока в проводнике в количестве 5 шт. (рисунок 2.7 (2));
- гладкий алюминиевый стержень (рисунок 2.7 (3));

– алюминиевый стержень с нанесенным на него витками проводника, имитирующие катушку (для подтверждения результатов предыдущего эксперимента с катушкой) (рисунок 2.7 (4)).



Рисунок 2.7 – Образцы низковольтных испытаний: 1 – образец провода; 2 – образец прута с пазами; 3 – образец гладкого прута; 4 – образец прута с намоткой

В результате измерений были построены графики зависимостей полного (рисунок 2.8), активного (рисунок 2.9) и реактивного сопротивления образцов (рисунок 2.10)

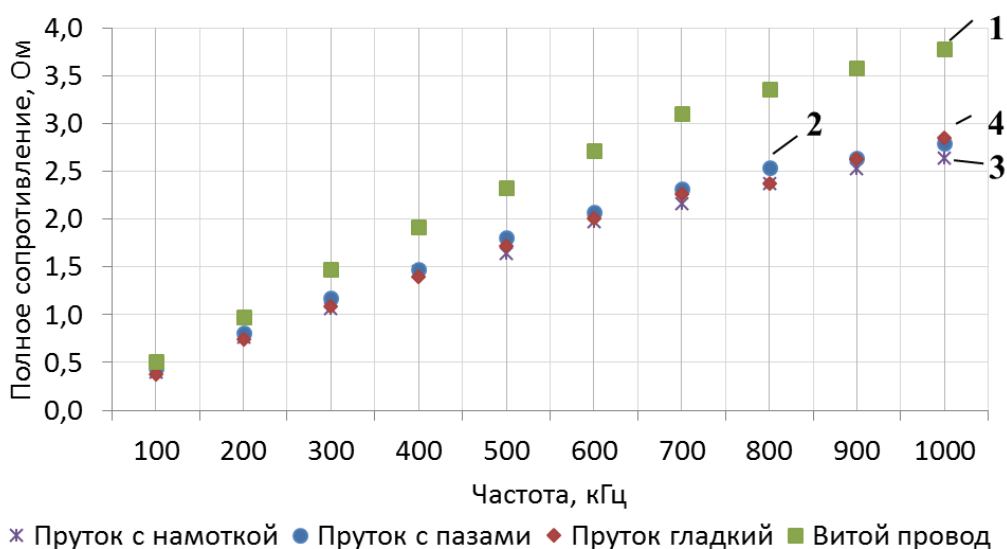


Рисунок 2.8 – Зависимость полного сопротивления от частоты: 1 – образец провода; 2 – образец прута с пазами; 3 – образец гладкого прута; 4 – образец прута с намоткой



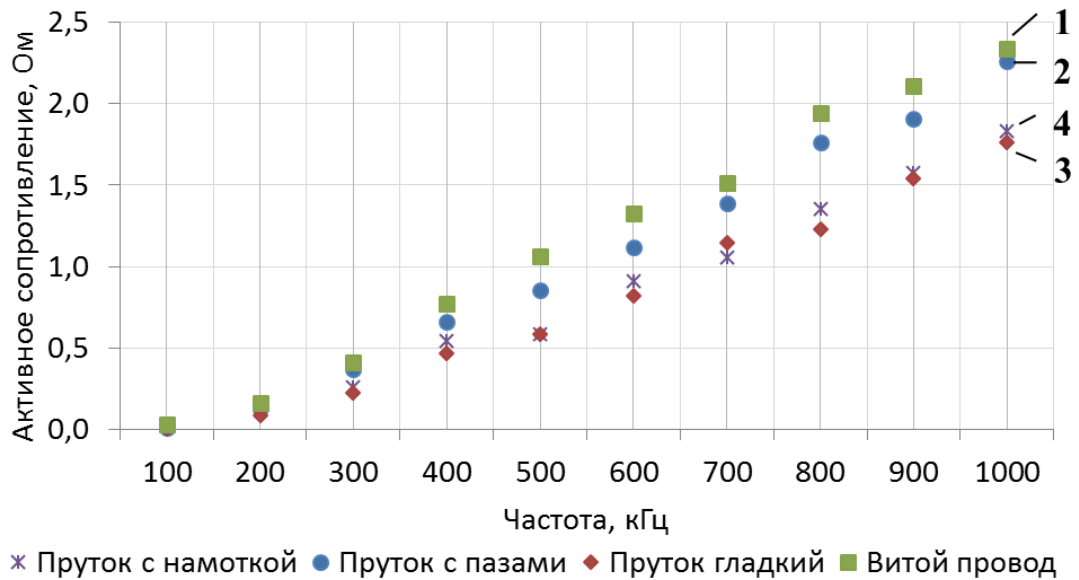


Рисунок 2.9 – Зависимость активного сопротивления от частоты: 1 – витой провод; 2 – образец прута с пазами; 3 – образец гладкого прута; 4 – образец прута с намоткой

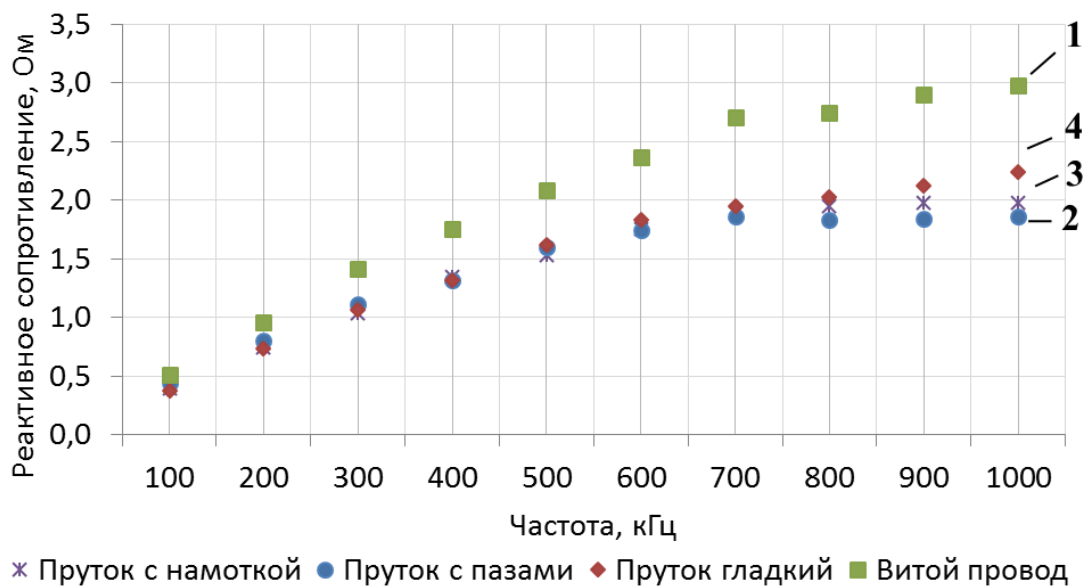


Рисунок 2.10 – Зависимость реактивного сопротивления от частоты: 1 – витой провод; 2 – образец прута с пазами; 3 – образец целого прута; 4 – образец прута с намоткой

Анализ полученных данных показал, что наибольшее активное сопротивление на грозовых частотах (200-300 кГц) имеет витой провод (1). Вторым по росту сопротивления является провод с бороздами вдоль течения тока (2). А

наименьший скин-эффект показывают целый прут и целый прут с намоткой. Результаты измерений показали, что образцы с большим количеством неровностей, расположенных вдоль направления течения тока, имеют более выраженный скин-эффект. Это можно объяснить тем, что ток протекает неоднородно по поверхности, очевидно под действием скин-эффекта в наиболее выпуклых областях поверхности повышается плотность протекания тока, и в дальнейшем происходит выталкивание тока в ферромагнитный слой и происходит увеличение сопротивления.

В результате проделанной работы выяснено что наибольшее сопротивление (полное и активное) имели образцы имеющие продольные пазы и выступы (образцы 1 и 2), что повлекло усиление скин-эффекта за счет повышения плотности тока на краях образцов и «выталкивания» тока в ферромагнитный материал. Эти выводы сходятся с результатами ранее проведенной работы [101] И подтверждают информацию, что для применения в ЧЗУ необходимо добиться увеличения плотности тока, то есть сконцентрировать ток на меньшей площади сечения.

Компьютерное моделирование, проведенное ранее, выявило что наибольшей эффективностью обладает форма провода, представленная на рисунке 2.11 (а) (Рост сопротивления в 11 000 раз на 50 Гц 0,16 мОм до 1,76 на 300 кГц), по сравнению с круглым проводом (б) (Рост сопротивления в 1600 раз на 50 Гц 0,19 мОм до 0,32 Ом на 300 кГц).

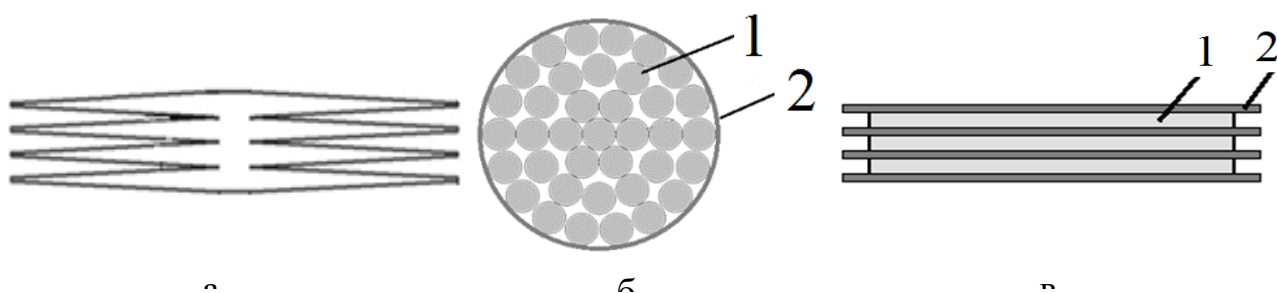


Рисунок 2.11 – Формы частотнозависимых проводов. а – лучшая форма проводника; б – круглая форма проводника; в – конструкция многослойного проводника типа; 1 – токоведущий проводник; 2 – ферромагнитный материал

Однако данная форма проводника обладает низкой механической прочностью и низкой технологичностью как при изготовлении, так и при сборке

конструкции в катушку (так как в форме катушки достигаются необходимые значения индуктивности, а также снижаются общие габариты защитного устройства). В связи с этим, для повышения технологичности и прочности провода была предложена форма провода (рисунок 2.11 (в)), представляющая собой многослойную конструкцию из чередующихся слоев проводника и ферромагнитного материала [107]. Следует отметить, что хотя важность влияния формы было отмечено ранее, но данная конструкция многослойного провода, предложена впервые.

### 2.1.3 Эксперименты с круглым и плоским многослойным образцом

Для проверки предположения об эффективности предложенной формы проводника были изготовлены макеты провода ЧЗУ круглой и многослойной плоской конструкции (рисунки 2.12 и 2.13).



Рисунок 2.12 – Макет круглого проводника: а) фотография образца, б) схема конструкции проводника: 1 – алюминиевый проводник, 2 – ферромагнитный слой, 3 – диэлектрический защитный слой



Рисунок 2.13 – Макет плоского многослойного проводника: а) фотография образца, б) схема конструкции проводника: 1 – алюминиевый проводник, 2 – ферромагнитный слой

Круглый провод ЧЗУ представляет собой трехслойный коаксиальный провод (рисунок 2.12). Внутренний слой - алюминиевый провод А-95, площадью сечения  $95 \text{ мм}^2$  (такое сечение используется в России для ВЛ 35 кВ), на него нанесен слой ферромагнитной ленты толщиной 0,3 мм. Третий, внешний слой - термоусаживаемая трубка ТУТ, которая защищает ферромагнитный слой от внешних механических и климатических воздействий.

Плоский многослойный макет проводника, показанный на рисунке 2.13, состоял из 6 слоев алюминиевого проводника, чередующихся с семью слоями ферромагнитной ленты 5БДСР. Каждый слой проводника имел толщину 0,3 мм и ширину 50 мм, толщина ферромагнитных слоев также составляла 0,3 мм, а ширина составляла 60 мм. Из-за разной ширины ферромагнитный материал выступал по краям на 5 мм с каждой стороны. Это должно было повысить эффективность за счет прохождения части тока в тонком ферромагнитном слое. Для сохранения формы макета использовались сжимающие конструкции из фанеры. В будущем его планировалось заменить на более удобную и эргономичную диэлектрическую конструкцию.

Оба провода имели алюминиевую токопроводящую часть длиной 0,7 метра. Площадь сечения жилы в обеих схемах была одинаковой и составляла  $95 \text{ мм}^2$ .

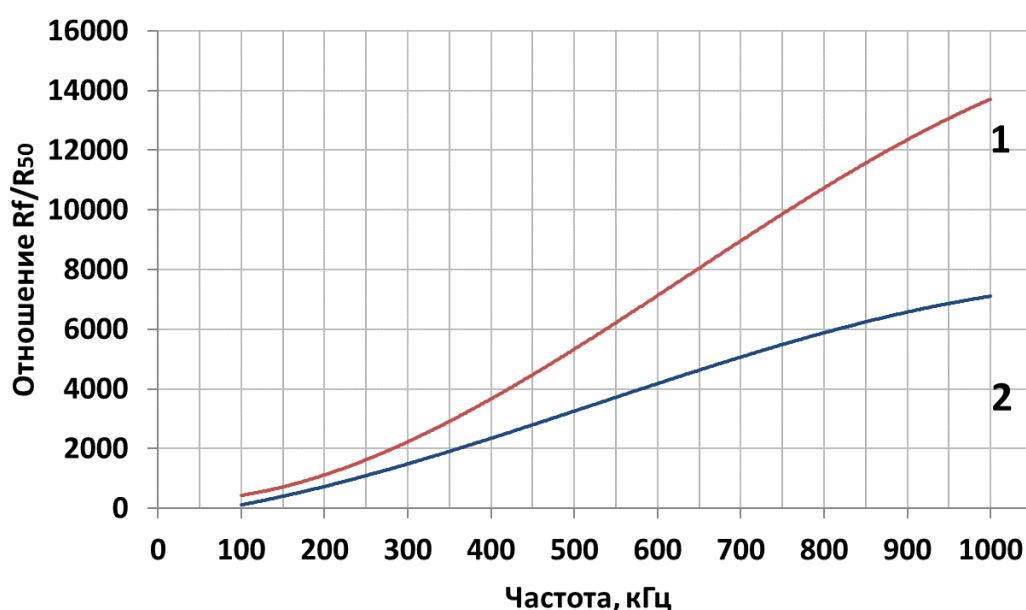


Рисунок 2.14 – Результаты испытаний: 1 - многослойный проводник; 2 - круглый проводник

Сравнение роста активного сопротивления макетов проводника ЧЗУ с проводом круглого сечения и макета ЧЗУ с многослойным проводником (рисунок 2.14) показало, что последний показывает более высокий рост активного сопротивления с увеличением частоты сигнала. На рисунке 2.14 показано, что на грозовых частотах (200–300 кГц) эффективность многослойного образца на 20–30% выше. При высокочастотных коммутационных перенапряжениях (~1 МГц) активное сопротивление многослойного образца более чем в 1,7 раза превышает сопротивление круглого образца.

### 2.1.4 Эксперименты с изменением числа слоёв проводника

Были проведены низковольтные эксперименты с оценкой влияния количества слоёв проводника. Идея была оценить, как эффект близости будет влиять на рост активного сопротивления в плоских многослойных проводниках. Для этого было изготовлено четыре образца с различным числом слоёв. Обобщённая схема на пример образца с тремя слоями представлена на рисунке 2.15.

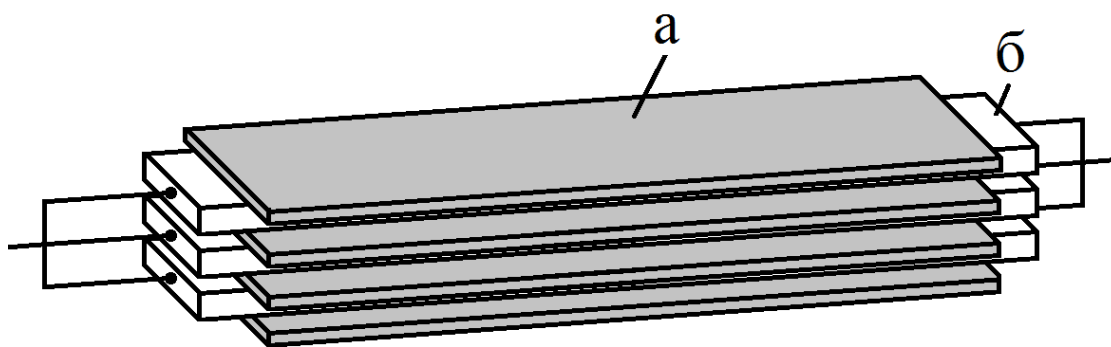


Рисунок 2.15 Схема образца с тремя слоями проводника: а – ферромагнитный материал; б – проводящий материал

Образцы представляют собой медные ленты (рисунок 2.15 б) длиной 320 мм, шириной 8 мм, толщиной 0,25 мм, соединённые параллельно между собой по краям проводника. Между проводниками располагался ферромагнитный слой, собранный из ферромагнитных лент (рисунок 2.15 а) длиной 300 мм, шириной 10 мм и толщиной 0,025 мм. Полная толщина ферромагнитного слоя между проводниками составляла 0,075 мм. Для обеспечения целостности конструкции,

края медных лент были спаяны, а макеты помещены в термоусадочную трубку (Трубка термоусадочная негорючая ГУТнг-25/12.5). Для обеспечения плотного прижатия ферромагнитного слоя к проводнику образцы помещались между 2 листами оргстекла фиксация обеспечивалась полиамидными винтами и гайками, сила прижатия была равна 4 Н. Всего было сделано три образца, с 1, 3, 5 и 15 слоями медной ленты. Результаты измерений показаны на рисунках (2.16-2.17).

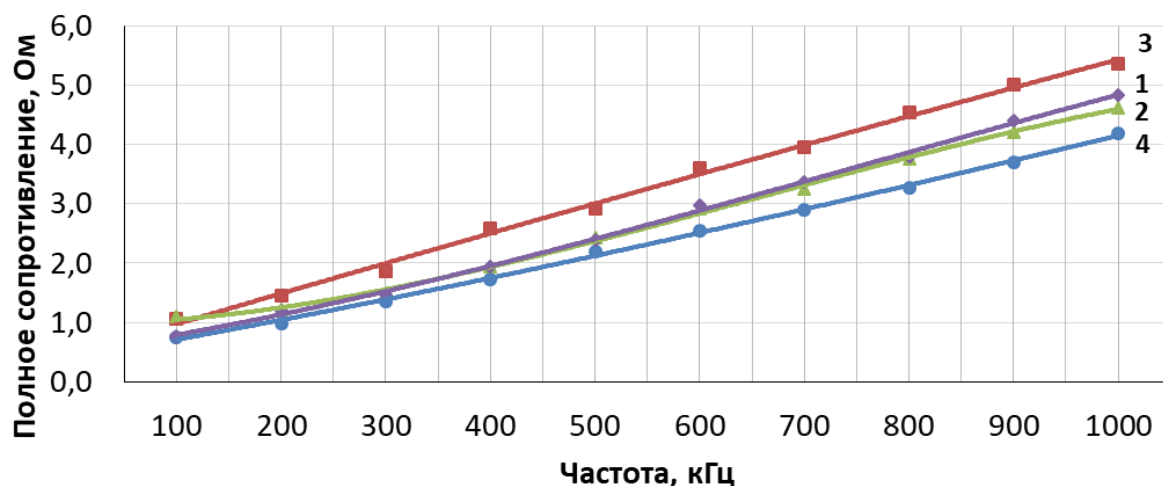


Рисунок 2.16 – Полное сопротивление образцов: 1 – пятнадцать полос проводника, 2 – пять полос, 3 – три полосы, 4 – одна полоса

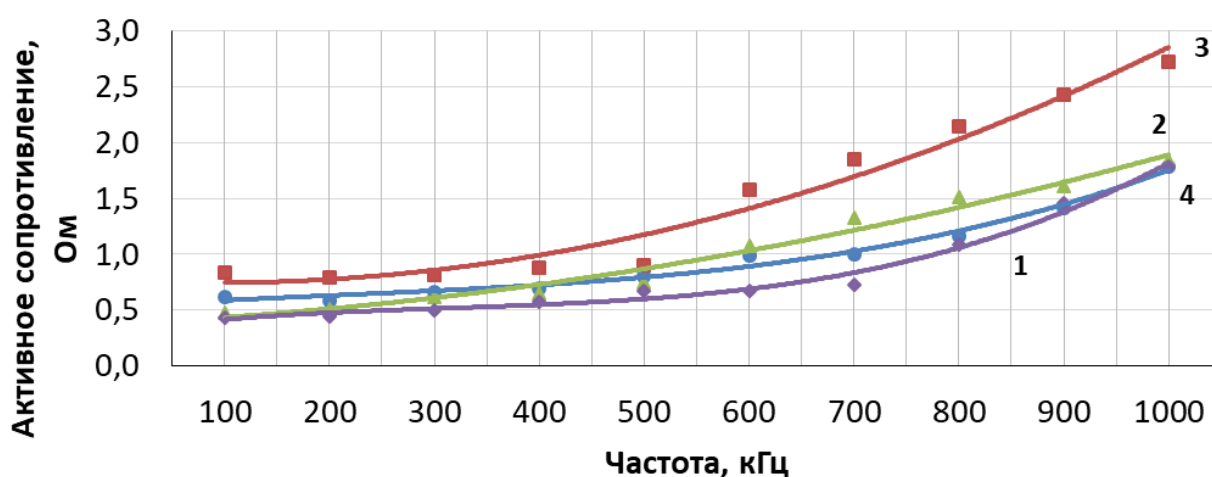


Рисунок 2.17 – Активное сопротивление образцов: 1 – пятнадцать полос проводника, 2 – пять полос, 3 – три полосы, 4 – одна полоса

Также была проведена оценка роста величины активного сопротивления по отношению к сопротивлению образцов на частоте 50 Гц (рисунок 2.18).

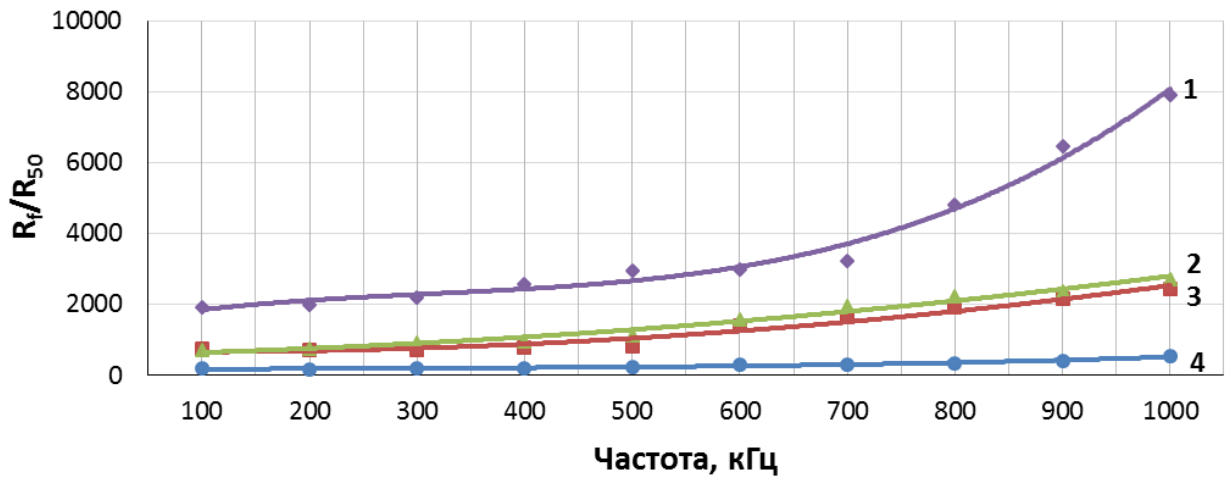


Рисунок 2.18 – Рост активного сопротивления образцов: 1 – пятнадцать полос проводника, 2 – пять полос, 3 – три полосы, 4 – одна полоса

Как видно из полученных рисунков в абсолютных значениях лучшие результаты показывает образец с тремя слоями проводника. Но в тоже время относительный рост активного сопротивления больше у образца с пятнадцатью слоями. Это можно объяснить тем, что в многослойных проводниках ближайшие проводники действуют, друг на друга увеличивая смещение тока к крайним слоям, однако этот эффект, судя по всему, оказывает наибольшее влияние, при малом количестве слоёв проводника и с ростом их количества, компенсируется уменьшением общего сопротивления образца.

### 2.1.5 Расчет влияния параметров «Толщина/ширина проводника/количество слоев проводника»

Следует отметить, что одновременно проводились компьютерные расчеты зависимостей «количество слоев проводника – толщина проводника – ширина проводника» определение зависимостей влияния параметров ферромагнитного слоя и габаритов проводника, а также для выявления наиболее оптимальных параметров ЧЗУ. Расчет проводился в программе, разработанной совместно с кафедрой прикладной математики ФПМИ НГТУ [108, 109].

В программе образец представляет собой бесконечный провод, состоящий из слоев проводника и ферромагнетика. Свернутый в квадратную катушку со стороной 1000 мм в пять витков. Толщина ферромагнитного слоя во всех расчетах

составляет 0,075 мм, ширина совпадает с шириной проводника. Суммарная площадь сечения проводника 35 мм<sup>2</sup>, частота подаваемого сигнала 300 кГц. Базовым был взят образец, представляющий 7 слоев проводника, толщиной 0,5 мм, шириной 30 мм.

Результаты расчетов показаны на рисунках 2.19 – 2.21. Для удобства под каждым графиком представлена таблица полученных значений (таблицы 2.1 – 2.3). Где  $I$  – ширина проводника,  $h$  – толщина одного слоя проводника.

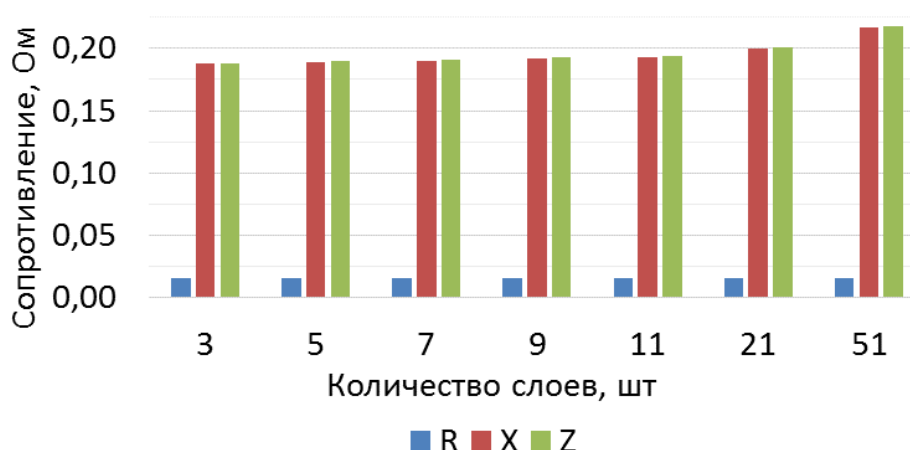


Рисунок 2.19 – Влияние отношения «Толщина проводника/количество слоев» на сопротивление образцов, при ширине проводника = 30 мм

Таблица 2.1 – Влияние отношения «Толщина проводника/количество слоев» на сопротивление образцов, при ширине проводника = 30 мм

n, кол-во	3	5	7	9	11	21	51
h, мм	1,17	0,7	0,5	0,39	0,32	0,167	0,069
R, мОм	15	15	16	16	16	16	15
X, мОм	188	191	191	192	193	200	217
Z, мОм	189	192	192	193	194	201	218

Из рисунка 2.19 и таблицы 2.1 видно, что при одной и той же ширине, изменение количества слоев практически не влияет на активное сопротивление, но в то же время, большее количество тонких слоев ведет к росту реактивного и полного сопротивлений.



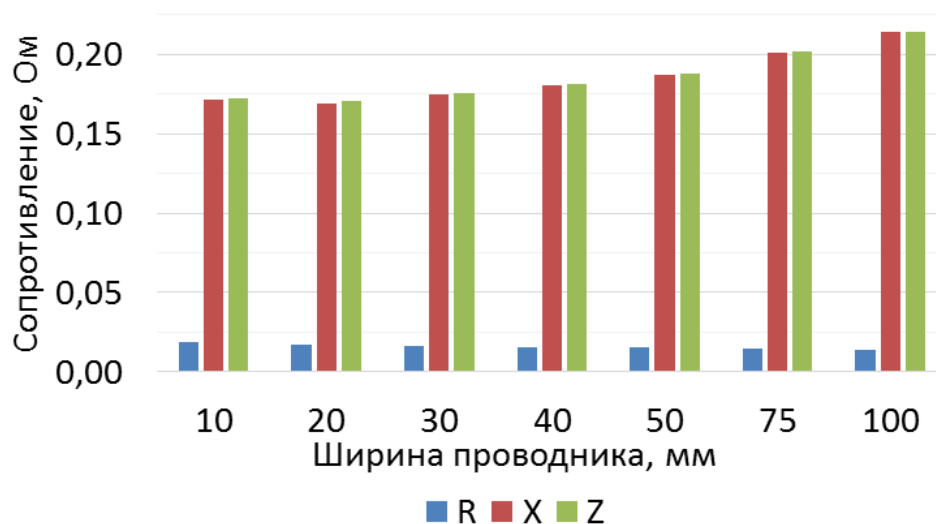


Рисунок 2.20 – Влияние отношения «Толщина проводника/ширина проводника» на сопротивление образцов, при количестве слоев проводника = 7 шт

Таблица 2.2 – Влияние отношения «Толщина проводника/ширина проводника» на сопротивление образцов, при количестве слоев проводника = 7 шт

l, мм	10	20	30	40	50	75	100
h, мм	1,5	0,75	0,5	0,375	0,3	0,200	0,150
R, мОм	19	17	16	16	15	15	14
X, мОм	171	170	175	181	187	201	214
Z, мОм	172	171	176	182	188	202	215

Как видно из рисунка 2.20 и таблицы 2.2, изменение отношения ширины проводника и толщины достаточно сильно влияет на изменение реактивного и полного сопротивлений (рост этих сопротивлений около 25 %), в тоже время, при малой ширине проводника (10 мм) и большой толщине (1,5 мм) активное сопротивление заметно больше, чем при более широких, но тонких проводниках, вплоть до 30 %. Это говорит о том, что при создании плоского провода, необходимо отдать предпочтение более узкому исполнению проводника, но большей толщины.

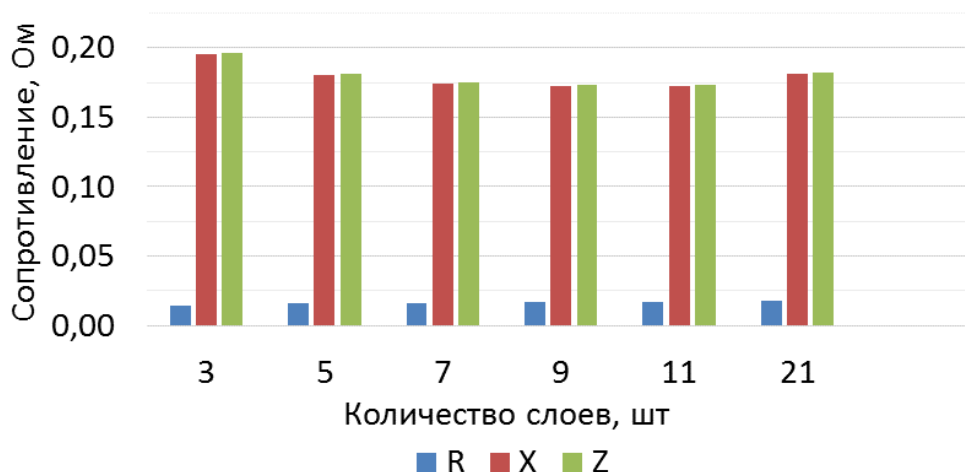


Рисунок 2.21 – Влияние отношения «Ширина проводника/количество слоев» на сопротивление образцов, при толщине проводника = 0,5 мм

Таблица 2.3 – Влияние отношения «Ширина проводника/количество слоев» на сопротивление образцов, при толщине проводника const=0,5 мм

п, кол-во	3	5	7	9	11	21
l, мм	70	42	30	23,3	19,1	10
R, мОм	15	16	16	17	17	18
X, мОм	196	180	175	172	172	181
Z, мОм	197	181	176	173	173	182

Из рисунка 2.21 и таблицы 2.3 видно, что при одной и той же толщине слоя проводника, количество слоев увеличивает рост активного сопротивления, в то время как у полного и реактивного сопротивления наблюдается провал в районе 9-11 слоев, что соответствует ширине 25-20 мм. Можно отметить, что существенного влияния на рост активного сопротивления толщина ферромагнитного слоя не оказывает, а поэтому он подбирался исходя из других оценок.

### 2.1.6 Эксперименты с различной ориентацией проводника в макете

Следующим шагом было решено исследовать влияние ориентации плоского проводника на эффективность устройства. Один из самых простых способов укладки плоского проводника большой длины, является скрутка его в спираль. Кроме уменьшения габаритов устройства и повышения индуктивности устройства,

данный способ может увеличить эффективность провода ЧЗУ, за счет магнитного поля катушки.

Для оценки эффективности сматывания в спираль были проведены эксперименты с трехслойными образцами (три слоя медного проводника толщиной 0,2 мм, толщина ферромагнитного слоя 0,3 мм) длиной 6 метров. Сворачивание в катушку проводилась двумя способами: в первом случае плоскость, в которой располагаются слои была перпендикулярна линиям магнитного поля катушки (рисунок 2.22 (а)). А во втором случае, плоскость, вдоль которой располагались слои провода была параллельна оси катушки (рисунок 2.22 (б)). Результаты измерений представлены на рисунках 2.23 – 2.25.

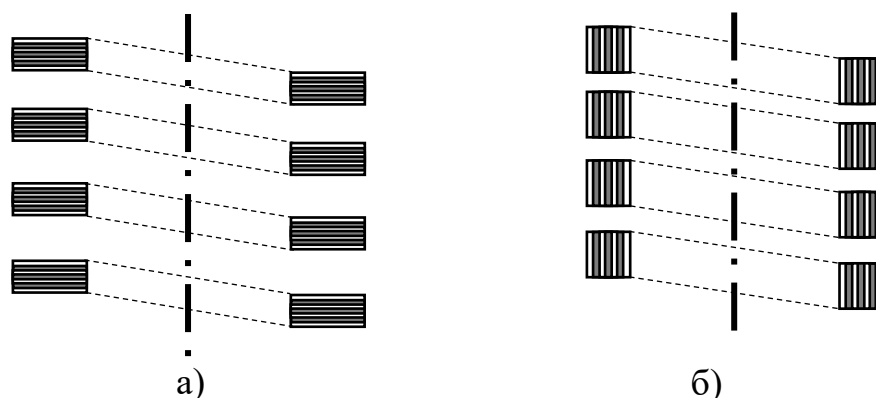


Рисунок 2.22 – Расположение слоев проводника относительно оси катушки: а) – перпендикулярно оси; б) – параллельно оси

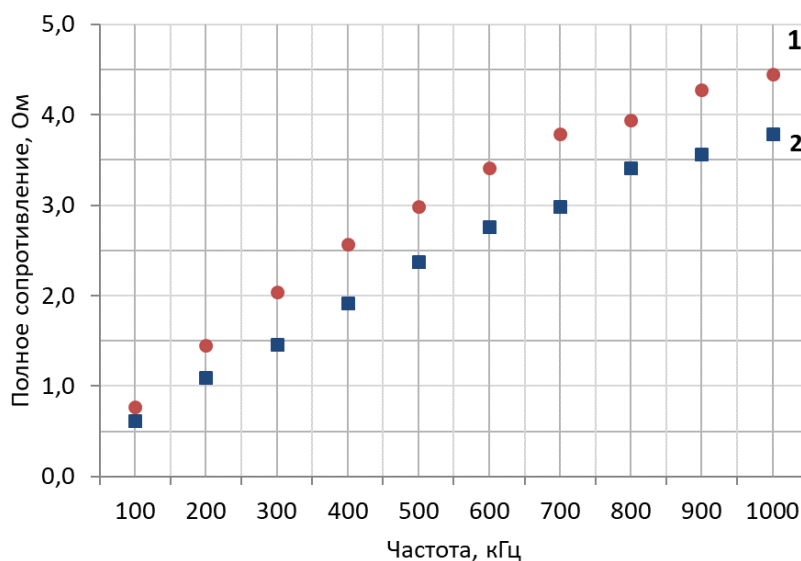


Рисунок 2.23 – Полное сопротивление макетов: 1 – слои перпендикулярны оси катушки; 2 – слои параллельны оси

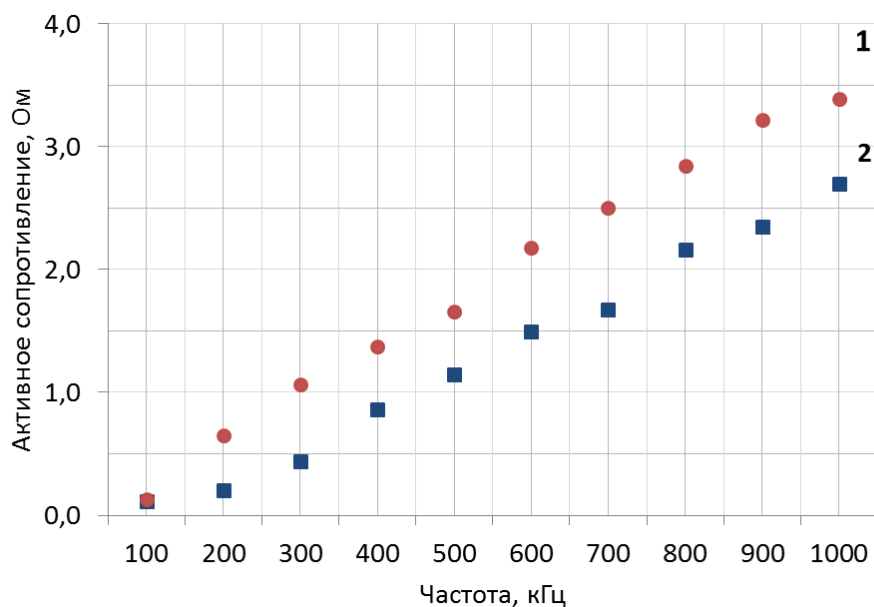


Рисунок 2.24 – Активное сопротивление макетов: 1 – слои перпендикулярны оси катушки; 2 – слои параллельны оси

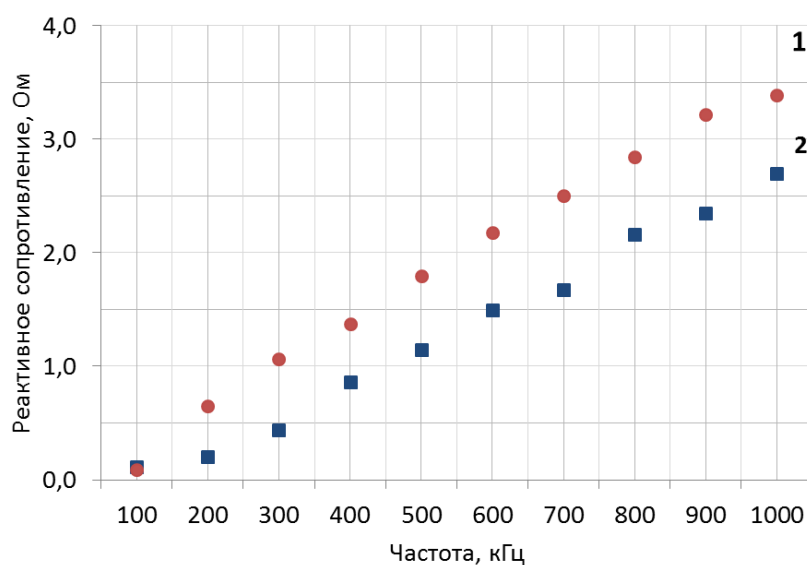


Рисунок 2.25 – Реактивное сопротивление макетов: 1 – слои перпендикулярны оси катушки; 2 – слои параллельны оси

Полученная разница в 10-15 % достигается всего лишь при 3 витках. При увеличении количества витков, а как следствие и магнитного поля, эффективность можно будет повысить на 50-60 %. Это в свою очередь позволит уменьшить габариты ЧЗУ.

### 2.1.7 Изготовление макетов частотнозависимых устройств

На основе полученных результатов было решено изготовить макеты круглого и многослойного ЧЗУ в виде катушек и сравнить получаемые результаты измерений, кроме того, было предложено проверить наблюдение, ранее высказанное представителем энергосетевой компании, о том, что высокочастотный заградитель (ВЧЗ) снижает высокочастотные перенапряжения. Были изготовлены следующие экспериментальные макеты:

- образец ЧЗУ с круглым проводником, представляет собой катушку с 6 витками (рисунок 2.26) с проводом А-95 (для ВЛ 35 кВ) с нанесенным на него слоем ферромагнитной ленты 5БДСР (толщиной 0,3 мм), расстояние между витками составило 6 мм;

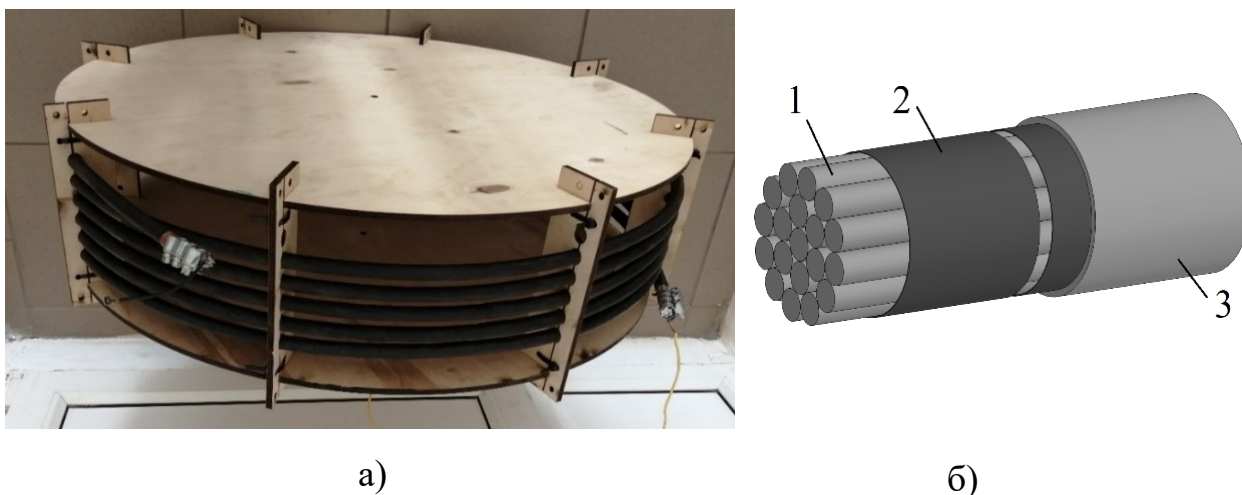


Рисунок 2.26 – ЧЗУ с круглым проводом: а) фотография макета; б) схема частотнозависимого проводника: 1 – токопроводящий материал; 2 – ферромагнитная лента; 3 – слой термоусадочной трубки

- образец ЧЗУ с плоским многослойным проводником, представляет собой катушку с 6 витками с многослойным алюминиевым проводником (рисунок 2.27 а). Проводник переставляет собой 6 слоев лент толщиной 0,3 мм, шириной 60 мм. Между слоями проводника расположен слой ферромагнитной ленты толщиной 0,3 мм. Плоскость проводника располагается перпендикулярно оси катушки (рисунок 2.27 б), так как предыдущие исследования показали, значительный

прирост эффективности в данном положении. Расстояние между витками 6 мм. выдерживалось толщиной применяемого фанерного листа;

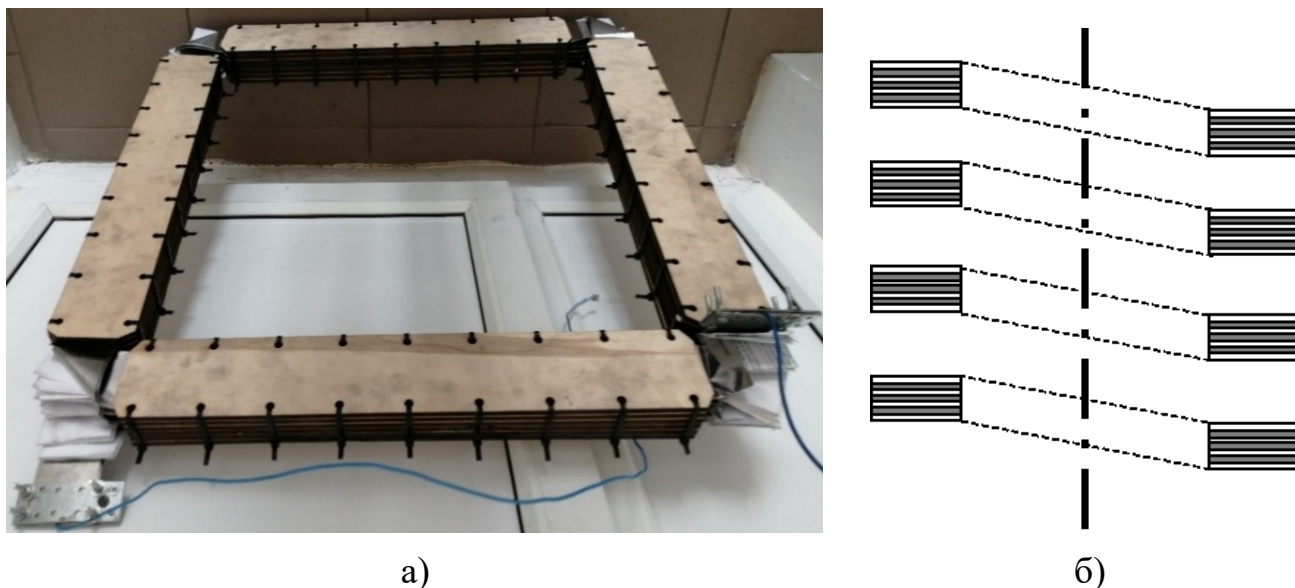


Рисунок 2.27 – ЧЗУ с плоским многослойным проводником: а) фотография образца, б) схема расположения слоев проводника

- сравнительный образец для проверки гипотезы о ВЧЗ представляет собой провод А-95, смотанный в катушку 6-ю витками (рисунок 2.28), также имеет расстояние между витками 6 мм.

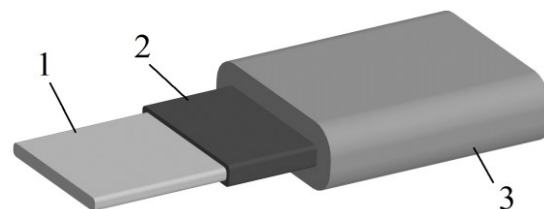


Рисунок 2.28 – Образец без ферромагнитной ленты для сравнения (макет силового реактора)

В процессе работы было предложено исследовать ЧЗУ с плоским однослойным проводником, имеющим прямоугольный профиль проводника (рисунок 2.29). Это связано с показанной малой эффективностью, которая будет показана дальше, а также с большой трудоемкостью изготовления, образца ЧЗУ с плоским многослойным проводником. Также возникают различные сложности при нанесении ферромагнитного слоя, которых позволяет избежать конструкция однослойного проводника.



а)



б)

Рисунок 2.29 – ЧЗУ с плоским однослойным проводником: а) фото макета; б) схема частотнозависимого проводника: 1 – токопроводящий материал; 2 – ферромагнитный слой; 3 – слой термоусадочной трубки

### 2.1.8 Низковольтные измерения макетов частотнозависимых устройств

Для образца ЧЗУ с плоским однослойным проводником, были проведены две серии измерений, с разным расстоянием между витками (6 и 9 мм), для оценки влияния длины катушки на рост сопротивлений.

Полученные результаты представлены на рисунках 2.30 и 2.31.

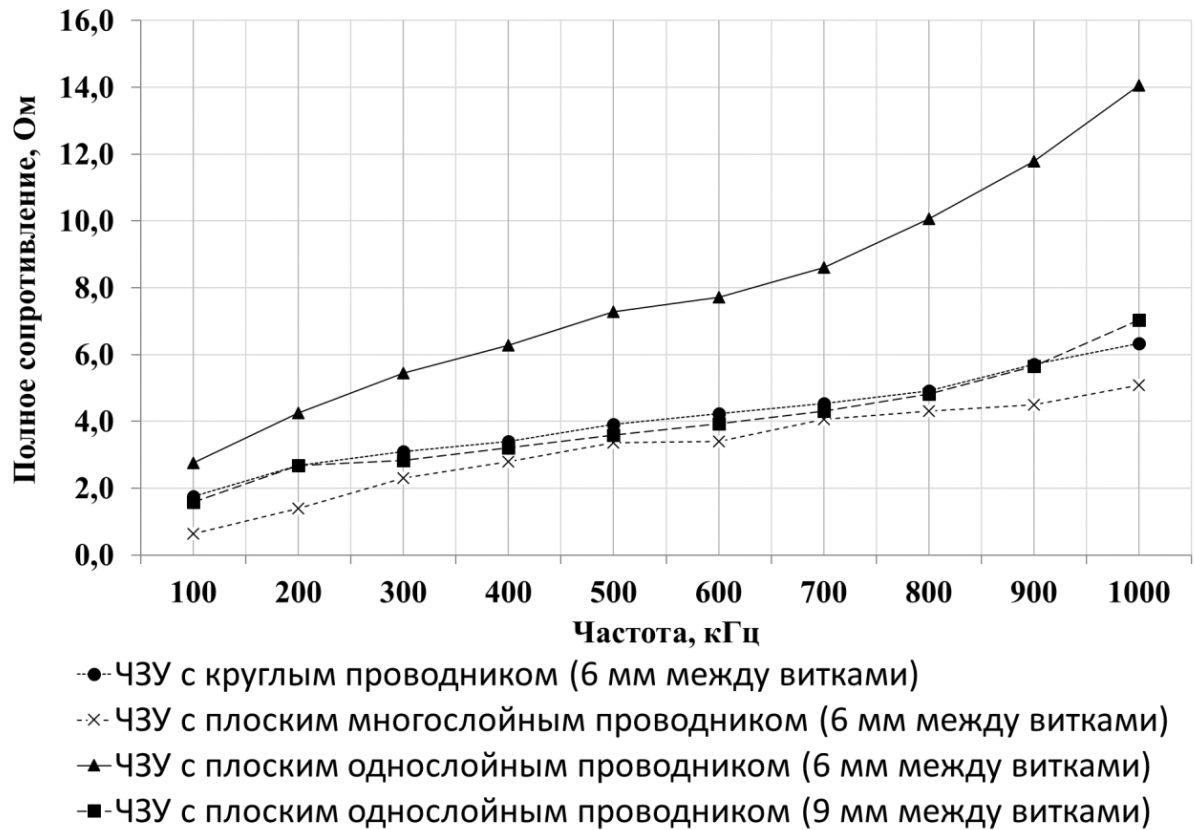


Рисунок 2.30 – Полное сопротивление макетов ЧЗУ

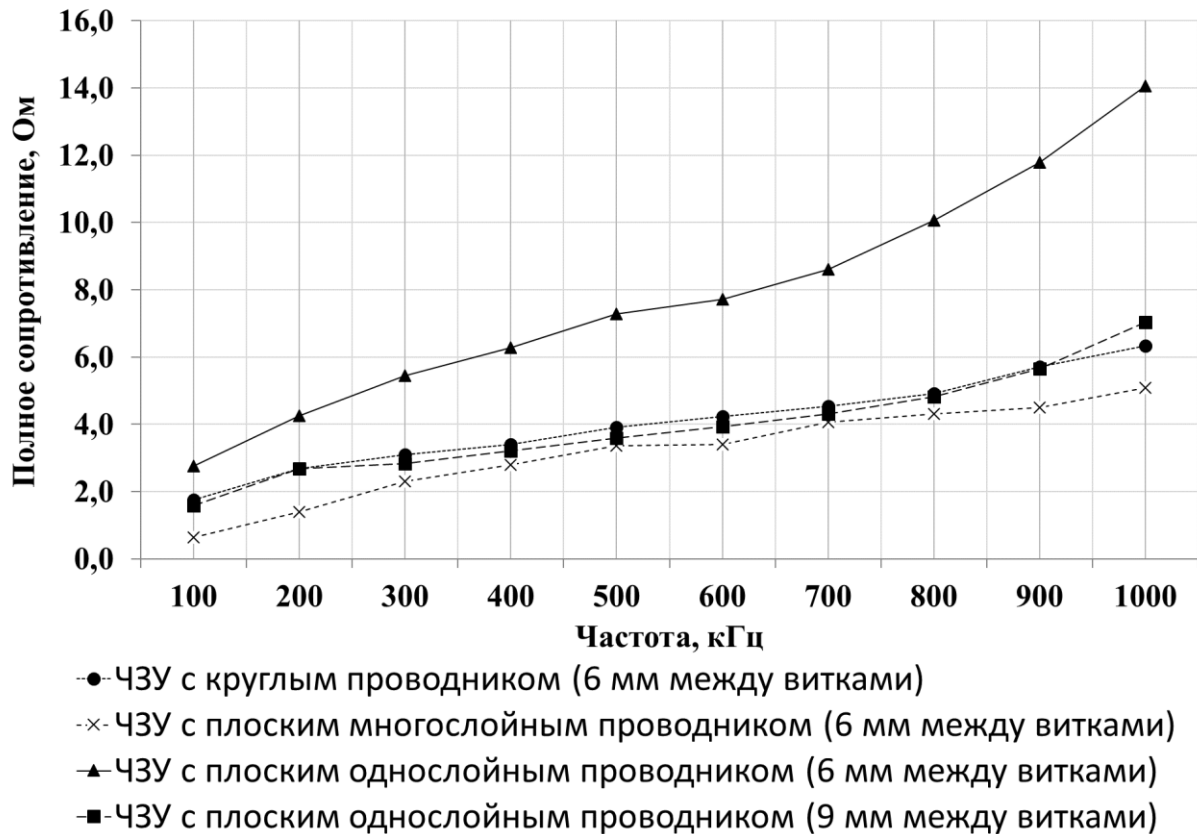


Рисунок 2.31 – Активное сопротивление макетов ЧЗУ



Видно, что на всем диапазоне частот образец ЧЗУ с плоским однослойным проводником с шагом 9 мм (расстояние между витками 6 мм) имеет большие показатели полного, реактивного и активного сопротивления, чем образец ЧЗУ с круглым проводником, примерно на 18 - 20 % на частотах 200-300 кГц, и с ростом частоты сигнала разница растет до 50 %. При этом ЧЗУ с плоским однослойным проводником с шагом 12 мм (расстояние между витками 9 мм), имеет меньшее сопротивление чем образец ЧЗУ с круглым проводником.

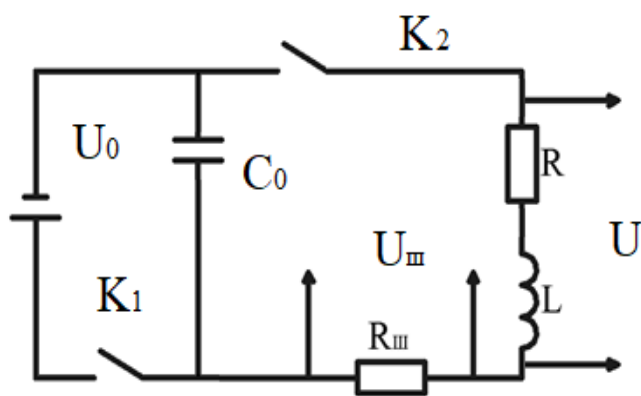
## 2.2 Испытания на импульсном напряжении

### 2.2.1 Экспериментальная установка

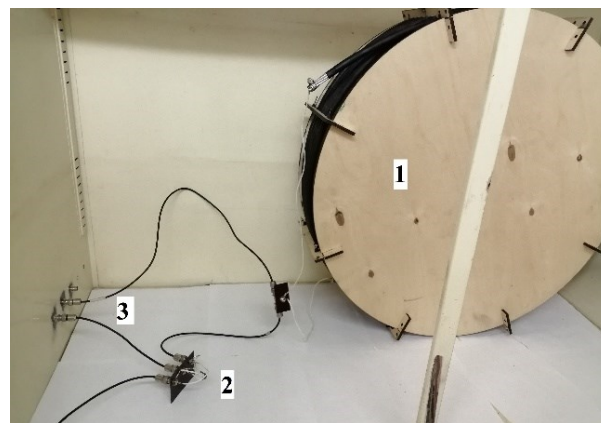
Для импульсных экспериментов применялась следующая схема измерения, состоящая из двух электрических цепей с общим конденсатором:

- одна, заряжающая цепь, состоящая из последовательно соединенного источника постоянного тока, ключа  $K_1$  и конденсатора  $C_0$ ;
- вторая, измерительная цепь, состоящая из конденсатора  $C_0$ , ключа  $K_2$ , шунта  $R_{ш}$  (0,5 Ом) и испытываемого образца ЧЗУ имеющего сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  (рисунок 2.32).

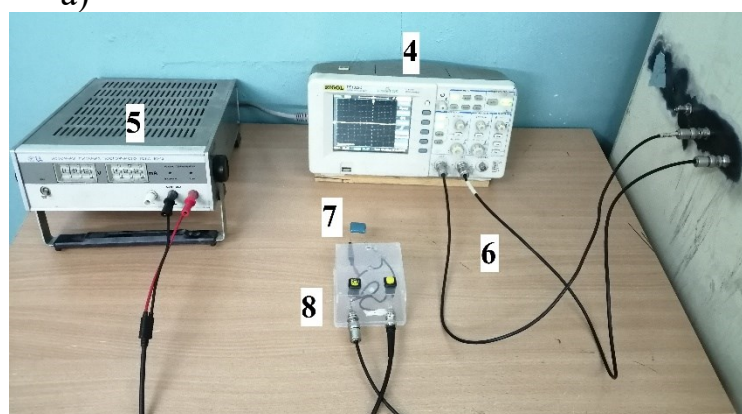
Процесс измерения представлял собой двухэтапный процесс. Сначала производилась зарядка конденсатора  $C_0$  при замкнутом ключе  $K_1$  и разомкнутом ключе  $K_2$ . После зарядки ключ  $K_1$  размыкался (для изолирования источника питания) и замыкался ключ  $K_2$ , который замыкал контур второй цепи и создавал замкнутый колебательный контур. Для измерения напряжения на шунтирующем сопротивлении ( $U_{ш}$ ) и образце ( $U$ ), применялся осциллограф (Rigol 1022C).  $U_{ш}$  и  $U$  – щупы осциллографа, которые фиксировали падение напряжения на  $R_{ш}$  и  $R$  соответственно.



а)



б)



в)

Рисунок 2.32 – Схема импульсных измерений: а) принципиальная схема; б) фактическая схема в шкафу; в) измерительная схема снаружи шкафа. Здесь: 1 – образец ЧЗУ; 2 – малоиндуктивный шунт (3 Ом); 3, 6 – соединительные кабели; 4 – осциллограф; 5 – источник напряжения; 7 – конденсатор; 8 – ключи для замыкания схемы зарядки и схемы измерения

Для измерения использовались керамические конденсаторы с различными номиналами емкостей, что позволяло добиться апериодических колебательных импульсов различной частоты. Частота образующегося колебательного процесса в системе зависит от включенных в цепь элементов и была индивидуальна для каждого образца. Полученные формы импульсов сохранялись в памяти осциллографа для дальнейшей обработки.

### 2.2.2 Методика измерения

Для определения активного сопротивления образцов ЧЗУ применялся способ, основанный на определении добротности колебательного контура  $Q$ , состоящего из образца ЧЗУ, емкости и шунтирующего сопротивления.

Широко известно, что добротность контура зависит от включенных в него элементов, и в случае наличия последовательных  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементов имеет вид (2.4):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

где:  $R$  – активное сопротивление контура (сумма сопротивлений образца, шунта и контактных сопротивлений  $R_{\text{обр}}$ ,  $R_{\text{шунт}}$ ,  $R_{\text{конт}}$ );

$C$  – емкость контура (будем считать что основной емкостной составляющей является включенная емкость с известным нам номиналом  $C_0$ );

$L$  - индуктивность контура (так как катушки имеют заведомо большую индуктивность чем проводники схемы, можно считать, что индуктивность полностью зависит от индуктивности образцов  $L_{\text{обр}}$ ).

Из формулы Томсона для периода колебательного контура (2.5):

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (2.5)$$

Зная период колебаний и емкость, можно определить индуктивность контура

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C} \quad (2.6)$$

Тогда из (2.4) и (2.6):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{T^2}{4\pi^2 C^2}} = \frac{T}{2\pi RC} \quad (2.7)$$

Тогда  $R$ :

$$R = \frac{T}{2\pi QC} \quad (2.8)$$

Добротность контура можно переопределить через коэффициент затухания (2.9):

$$Q = \frac{\pi}{\gamma T} \quad (2.9)$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau} \quad (2.10)$$

где:  $\tau$  – время затухания колебаний или интервал времени, в течении которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e \approx 2,7$  раз;

Тогда из (2.8), (2.9) и (2.10) сопротивление контура:

$$R = \frac{T^2}{2\pi^2 \tau C} \quad (2.11)$$

Вычитая из полученного сопротивления значение сопротивления шунта, получали сопротивление образца.

В ручном режиме измерялся сдвиг фаз между пиками напряжения и тока и период колебаний  $T$ . Далее по пикам гармоник строился график затухания колебаний и определялся интервал времени  $\tau$ , в течении которого амплитуда колебаний уменьшается в 2,7 раза. По значению  $\tau$  и периоду колебаний  $T$  рассчитывались значения добротности колебательного контура  $Q$ .

В качестве образцов для испытаний применялись образцы, ранее представленные на рисунках (2.26-2.29).

### 2.2.3 Результаты измерений

Ниже приведены номиналы использованных емкостей и соответствие полученных частот колебательных процессов для образцов (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Номиналы емкостей и соответствие частоты входного сигнала

С, нФ	2000	1000	680	100	47	33	22	10
Частота, ЧЗУ с круглым проводником, кГц	10	15	23	63	91	111	143	200
Частота, макет силового реактора, кГц	19	27	35	83	125	149	189	250
Частота, ЧЗУ с плоским однослойным проводником, кГц	9	15	17	56	83	100	111	-
Частота, ЧЗУ с плоским многослойным проводником, кГц	44	73	100	278	435	526	667	-

На рисунке 2.33 представлены примеры полученных осциллограмм

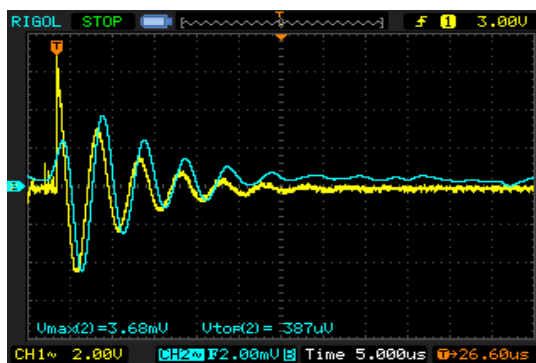
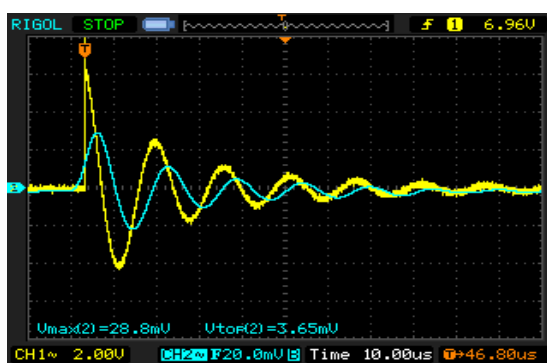
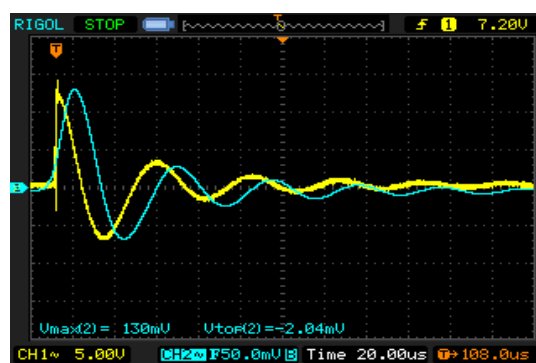
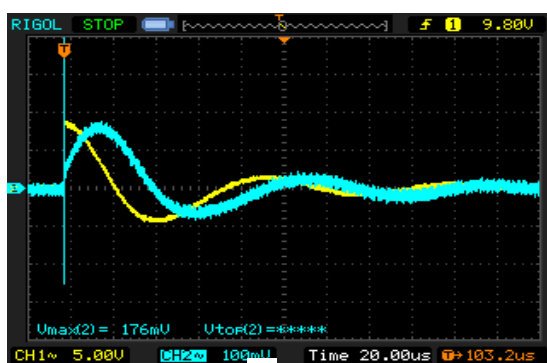


Рисунок 2.33 – Примеры полученных осциллограмм на образце ЧЗУ с круглым проводником при различных емкостях: а) 2 мкФ, б) 680 нФ, в) 100 нФ, г) 10 нФ

На рисунке 2.34 представлены зависимости активного сопротивления от частоты после обработки результатов измерений.

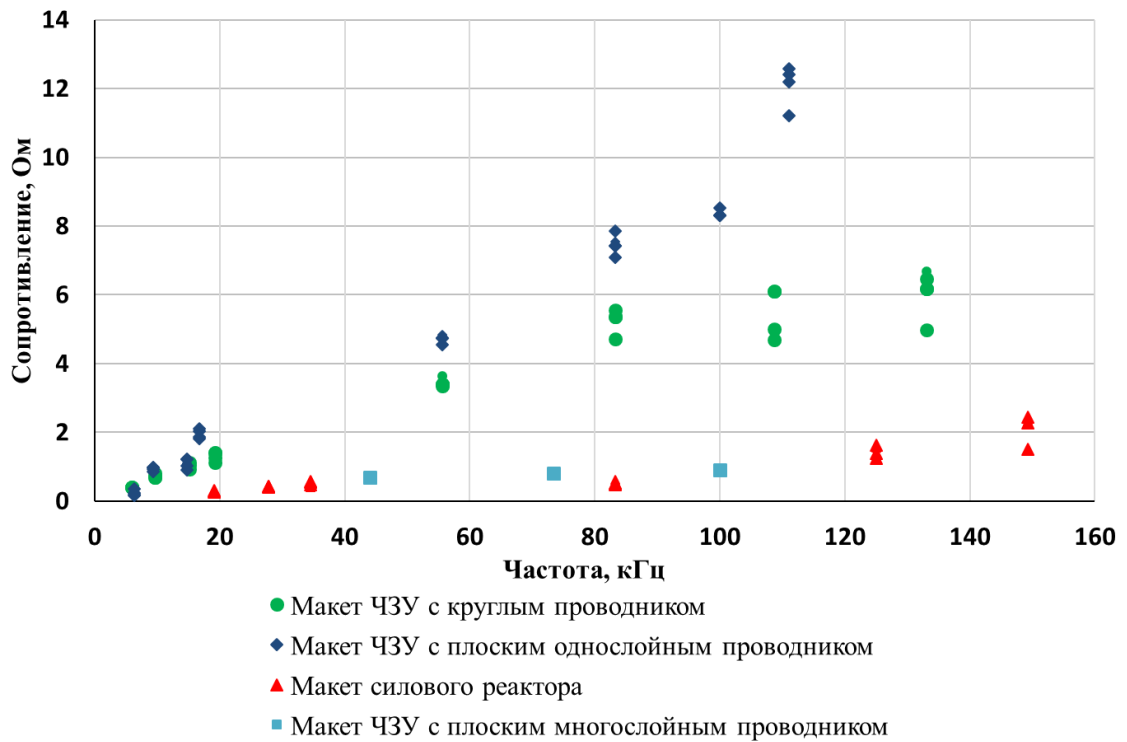


Рисунок 2.34 – Сопротивление образцов на различных частотах

После приведения полученных данных к 1 метру длины проводника, были получены следующие результаты, представленные на рисунке 2.35.

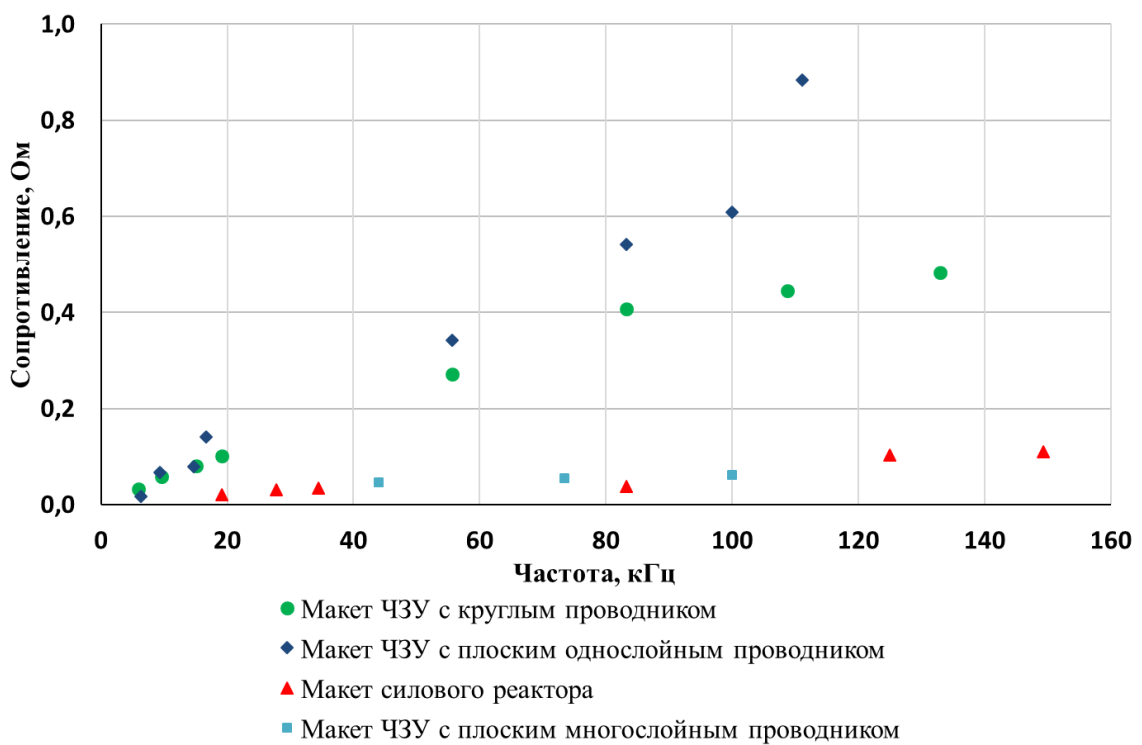


Рисунок 2.35 – Сопротивление образцов на различных частотах, приведённое к 1 метру

Также для подтверждения полученных тенденций были проведены серии измерений образцов с помощью RLC-метра AM-3002. на 5 частотах (100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц). Полученные результаты измерения сопротивления и индуктивности образцов представлены на рисунках 2.36, 2.37 и в таблице 2.5.

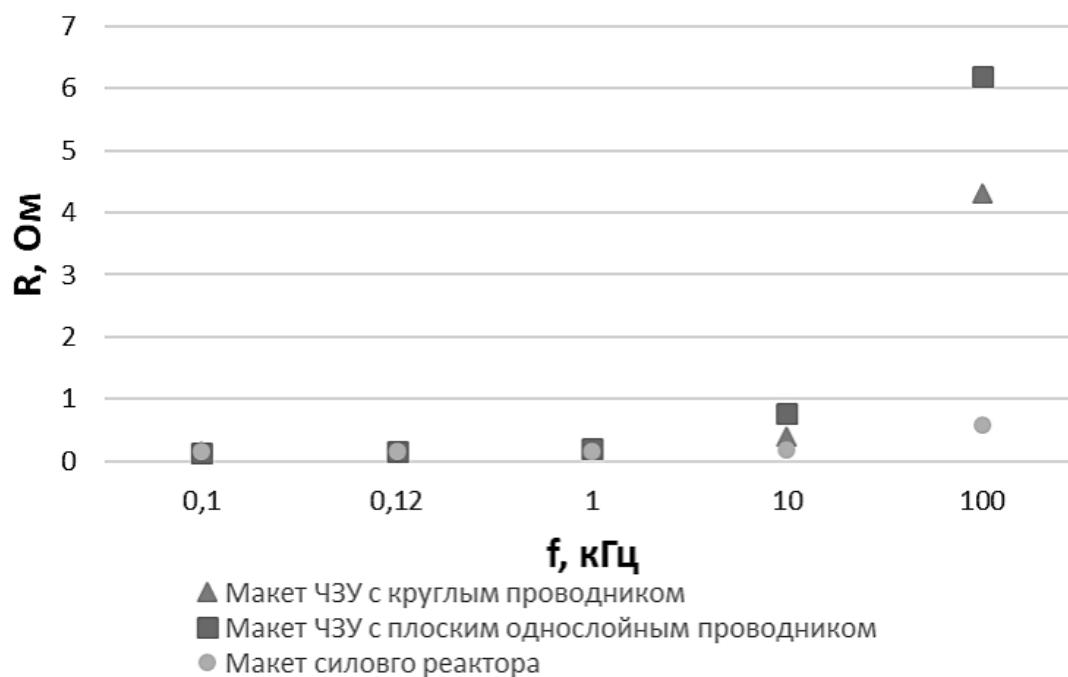


Рисунок 2.36 – Активное сопротивление образцов ЧЗУ

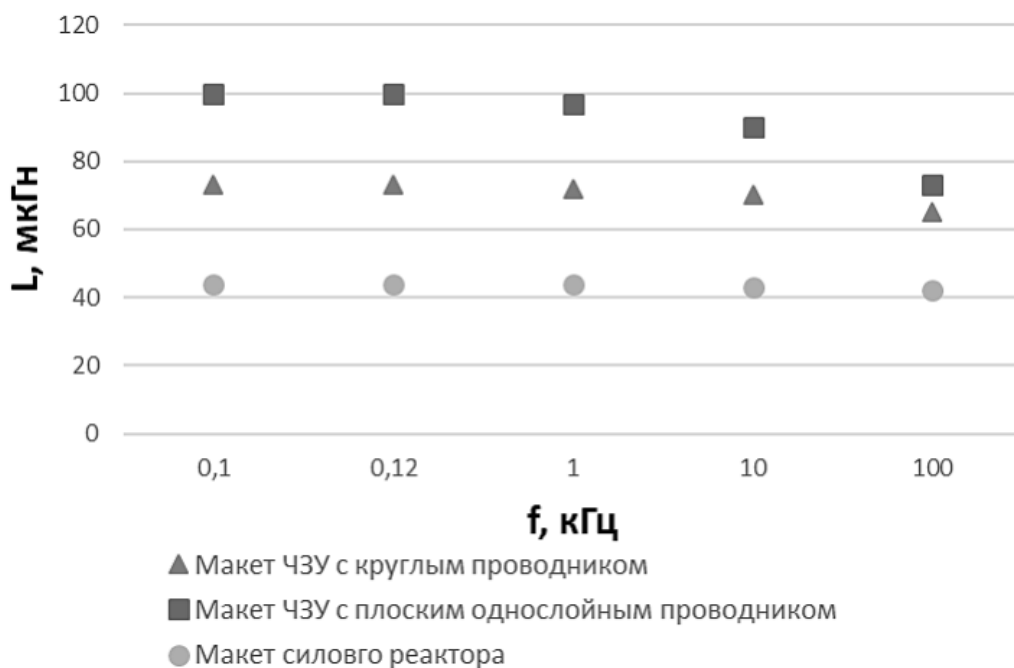


Рисунок 2.37 – Индуктивность образцов ЧЗУ

Таблица 2.5 – Результаты измерений RLC-метром

ЧЗУ с круглым проводником				
f, кГц	L, мкГн	R, мОм	C, мкФ	Q
0,1	73	0,16	34760	0,3
0,12	73	0,16	24090	0,4
1	72	0,18	350	2,6
10	70	0,39	4	10
100	65	4,32	0,039	11
ЧЗУ с плоским однослойным проводником				
f, кГц	L, мкГн	R, мОм	C, мкФ	Q
0,1	100	0,14	25440	0,4
0,12	100	0,15	17590	0,5
1	97	0,20	260	3,1
10	90	0,76	3	7
100	73	6,2	0,034	8
Макет силового реактора				
f, кГц	L, мкГн	R, мОм	C, мкФ	Q
0,1	44	0,15	57860	0,1
0,12	44	0,15	40220	0,2
1	44	0,15	581,9	1,8
10	43	0,18	6	15
100	42	0,59	0,06	45

Жирным выделены сопротивления на частотах 100 Гц и 100 кГц, как видно у ЧЗУ с круглым проводником рост сопротивления происходит практически в 27 раз, а у ЧЗУ с плоским однослойным проводником в 40 раз, макет силового реактора сопротивление возросло в 4 раза. При этом, индуктивность образца практически не изменяется. Сопоставление данных, показывает, что полученные в результате импульсных измерений значения сопротивлений были близки, но все же несколько выше по сравнению с RLC измерениями. Скорее всего, это может быть связано с сопротивлениями искры и контактов, которые не учитывались в расчёте активного сопротивления образцов ЧЗУ.

Результаты импульсных измерений показывают, что конструкция ЧЗУ с плоским многослойным проводом уступает в росте активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводом, следовательно, необходимо вносить изменения в конструкцию плоского провода. Было предложено одно из решений: уменьшение ширины проводящего слоя, чтобы ферромагнитные слои образовывали



выступающие края, это должно повысить эффективность ЧЗУ с плоским многослойным проводом.

Было подтверждено, что применение конструкции ЧЗУ с плоским однослойным проводником, выполненным токопроводящими шинами, позволяет повысить рост активного сопротивления относительно ЧЗУ с круглым проводником.

Так же следует отметить низкую эффективность образца без ферромагнитной ленты (макета силового реактора) по сравнению с ЧЗУ с круглым и плоским однослойным проводниками, малое сопротивление не позволит снижать амплитуду импульса. Это может говорить о малой эффективности применения силовых реакторов без дополнительных устройств, в качестве защитного оборудования, по сравнению с применением любой конструкции ЧЗУ.

## **Выводы по Главе 2**

В результате работы по 2 главе:

1) показано что применение конструкции, в которой плоскости плоского проводника находится перпендикулярно магнитным полям катушки позволяет повысить эффективность ЧЗУ по сравнению с другой ориентацией;

2) проведена сборка макетов ЧЗУ с круглым, плоским однослойным и плоским многослойным проводниками, а также макета силового реактора;

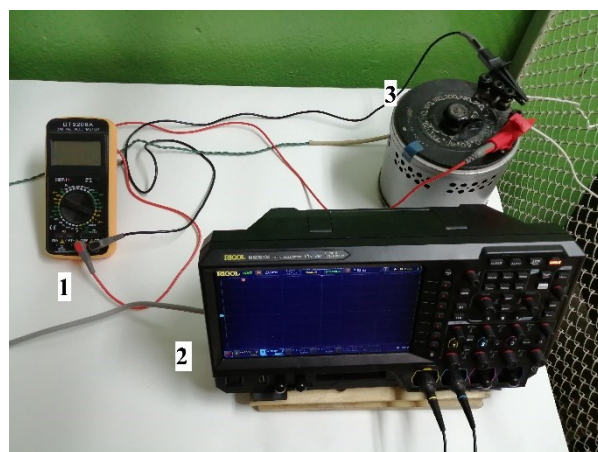
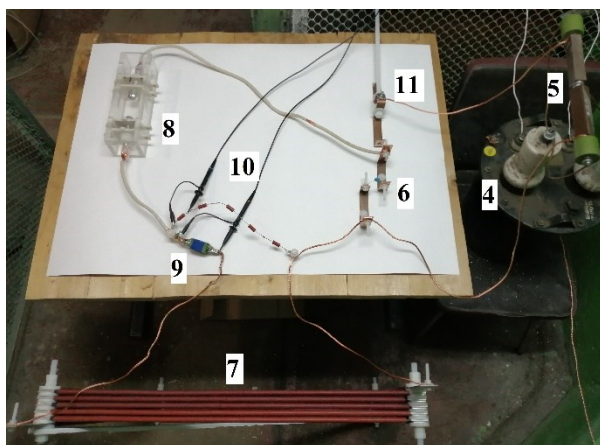
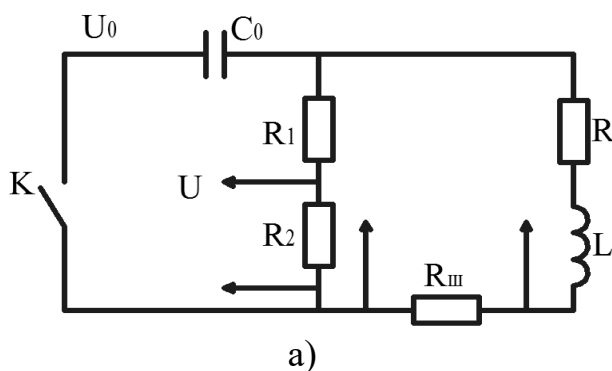
3) показана высокая эффективность применения плоского однослойного проводника в катушке ЧЗУ по сравнению с круглым проводником;

4) не выявлено эффективного подавления импульсных сигналов макетом силового реактора.

## ГЛАВА 3 СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1 Экспериментальная установка

Для проведения сильноточных измерений макетов ЧЗУ была использована схема, показанная на рисунках 3.1. По сути, эта схема эквивалентна использованной в п. 2.2.2, за исключением делителя напряжения.



в)

Рисунок 3.1 – Схема сильноточных испытаний: а) принципиальная схема; б) измерительная часть; в) схема включения образца. Здесь: 1 – мультиметр для контроля напряжения на ЛАТРе; 2 – осциллограф; 3 – ЛАТР; 4 – повышающий трансформатор; 5 – удвоитель-выпрямитель; 6 – конденсатор; 7 – образец ЧЗУ; 8 – разрядник для замыкания цепи с образцом ЧЗУ; 9 – шунт малоиндуктивный 0,5 Ом; 10 – измерительные щупы от шунта и нижнего плеча делителя; 11 – ключ цепи заряжения конденсатора

Для создания импульса использовались керамические конденсаторы емкостью 4,7 и 15 нФ, ЛАТР-1М и повышающий трансформатор высокого

напряжения НОМ 10, с коэффициентом трансформации 100. В результате применения трансформатора и выпрямителя-удвоителя напряжения Латура — Делона — Гренашера [4] (рисунок 3.2).

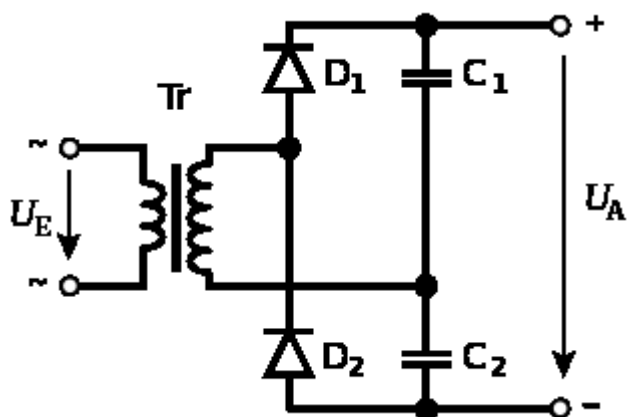


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема выпрямителя умножителя

ЛАТРОм регулировалось напряжение заряда конденсатора. Зарядное напряжение от генератора измерялось с помощью мультиметра, подключенного к низковольтной стороне трансформатора. Частота входного импульса изменялась подбором емкости конденсатора  $C_0$ . В сильноточных экспериментах применялись емкости 15, 4,7 и 2,2 нФ, так как они формировали частотный диапазон 100 ÷ 300 кГц. Шунт был собран из 20 параллельных малоиндуктивных сопротивлений ТВО 10 Ом. В результате сопротивление шунта  $R_{ш}$  составляло 0,5 Ом. Осциллограф марки RIGOL типа MS 5104 запускался от сигнала делителя напряжения схемы включения.

Методика измерений соответствует показанной ранее в п. 2.2.2.

Целью сильноточных испытаний являлось оценка влияния протекающего тока через образцы ЧЗУ на активное сопротивление и по возможности определение значений токов насыщения на различных частотах. Макеты, на которых проводились эксперименты, были использованы ранее для проведения низковольтных измерений на переменном и импульсном напряжении: ЧЗУ с круглым проводником (рисунок 2.26), ЧЗУ с однослойным плоским проводником (рисунок 2.29).

### 3.2 Результаты сильноточных испытаний

#### 3.2.1 Результаты для образцов частотнозависимых устройств на частотах 140 и 130 кГц

На рисунке 3.3 приведены примеры полученных диаграмм. По каждому образцу ЧЗУ проводились по три серии измерений для каждого напряжения.

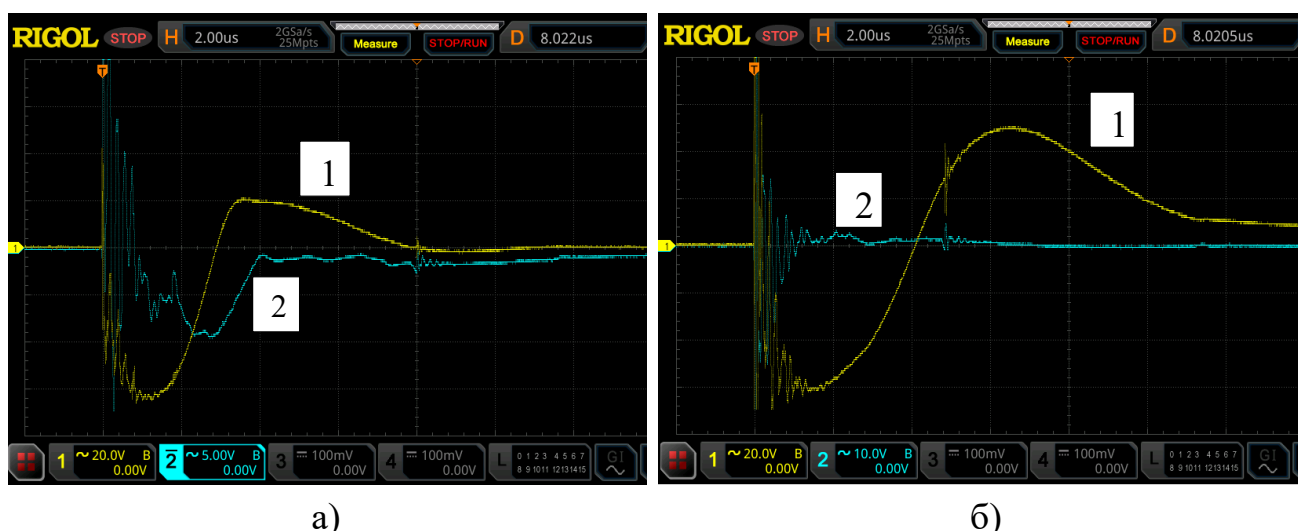


Рисунок 3.3 – Примеры полученных импульсов с конденсатором емкостью 15 нФ, 1 – сигнал с шунта; 2 – сигнал с нижнего плеча делителя: а) ЧЗУ с круглым проводником; б) ЧЗУ с плоским однослойным проводником

В результате обработки, полученных данных, расчетные значения силы тока и активного сопротивления на частоте 140 кГц для образца ЧЗУ с круглым проводником сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводником на частоте входного сигнала 140 кГц

I, A	112	134	268	321	517	631	1237
R <sub>1</sub> , Ом	14,1	13,1	10,3	8,8	8,3	7,2	6,3
R <sub>2</sub> , Ом	12,0	12,3	9,8	7,9	7,5	6,8	5,5
R <sub>3</sub> , Ом	13,5	11,1	10,6	7,7	7,2	6,9	5,9

Для образца ЧЗУ с плоским однослойным проводником полученные значения сведены в таблицу 3.2, при этом частота сигнала, полученного равна 130 кГц.

Таблица 3.2 – Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ с плоским однослойным проводником на частоте входного сигнала 130 кГц

I, А	91	117	204	276	483	784	1157
R <sub>1</sub> , Ом	17,2	14,4	11,7	9,5	7,4	7,1	7,1
R <sub>2</sub> , Ом	15,8	15,1	10,9	10,7	8,1	7,6	6,4
R <sub>3</sub> , Ом	18,1	13,5	11,4	8,8	8,9	7,7	5,9

График зависимости активного сопротивления от проходящего тока на данных частотах для каждого образца приведены на рисунках 3.4 и 3.5.

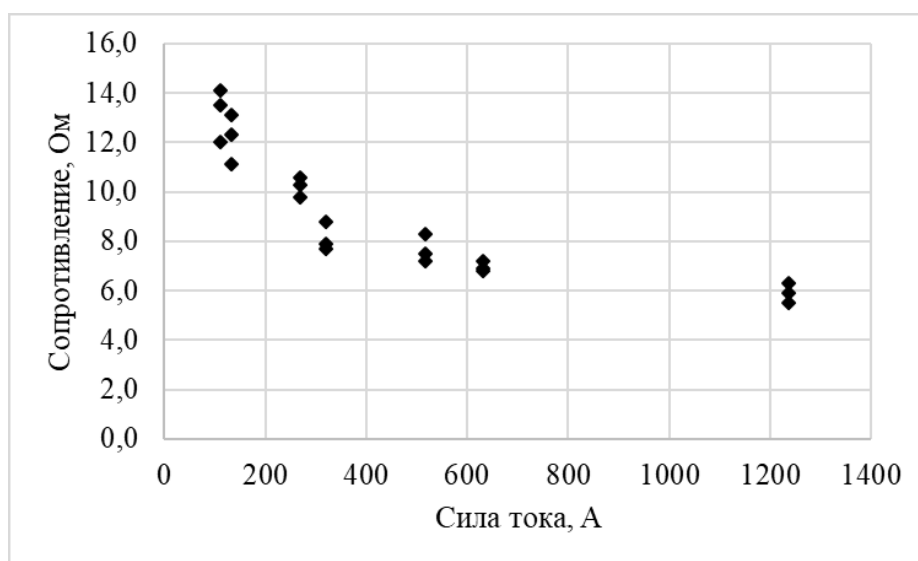


Рисунок 3.4 – Зависимость активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводником от проходящего тока на частоте 140 кГц

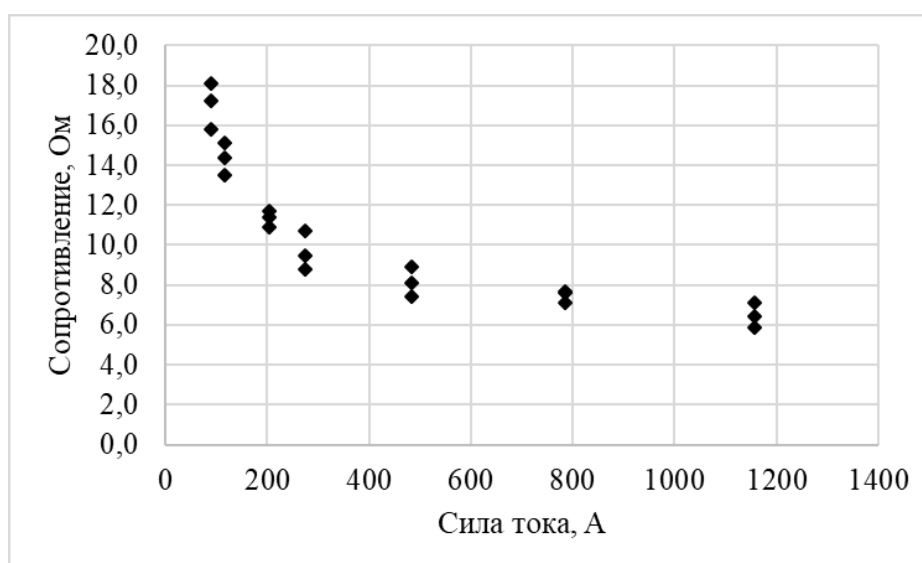


Рисунок 3.5 – Зависимость активного сопротивления ЧЗУ с плоским однослойным проводником от проходящего тока на частоте 130 кГц

### 3.2.2 Результаты для образцов частотнозависимых устройств на частотах 280 и 250 кГц

После проведения 3 серий измерений и расчетов, полученные значения сопротивления и токов приведены в таблицах 3.3 и 3.4. Для образца ЧЗУ с круглым проводником частота полученного сигнала составила 250 кГц, а для ЧЗУ с плоским однослойным проводником 280 кГц.

Таблица 3.3 – Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводником на частоте входного сигнала 280 кГц

I, А	94	118	209	342	634	841	1263
R <sub>1</sub> , Ом	19,1	17,8	15,7	12,7	11,1	10,3	10,1
R <sub>2</sub> , Ом	18,5	16,1	14,3	12,3	12,3	12,2	11,1
R <sub>3</sub> , Ом	18,1	15,9	15,4	14,1	12,6	11,8	9,8

Таблица 3.4 – Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ с плоским однослойным проводником на частоте входного сигнала 250 кГц

I, А	80	149	214	256	457	659	1183
R <sub>1</sub> , Ом	24,8	22,9	20,6	19,3	16,7	15,4	14,3
R <sub>2</sub> , Ом	22,3	20,8	17,7	18,3	17,6	13,7	12,7
R <sub>3</sub> , Ом	23,1	21,4	19,4	19,0	15,4	12,1	12,5

График зависимости активного сопротивления от проходящего тока на данных частотах для каждого образца приведены на рисунках 3.6 и 3.7.

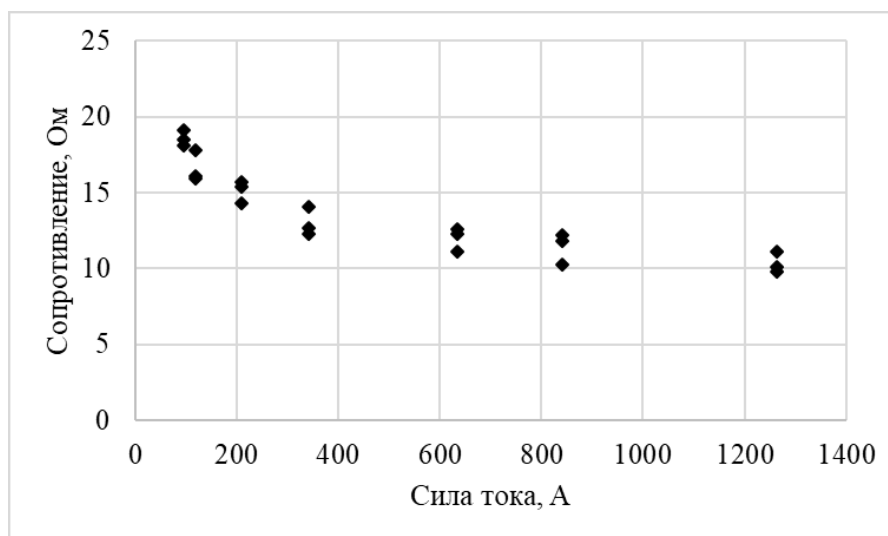


Рисунок 3.6 – Зависимость активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводником от проходящего тока на частоте 280 кГц

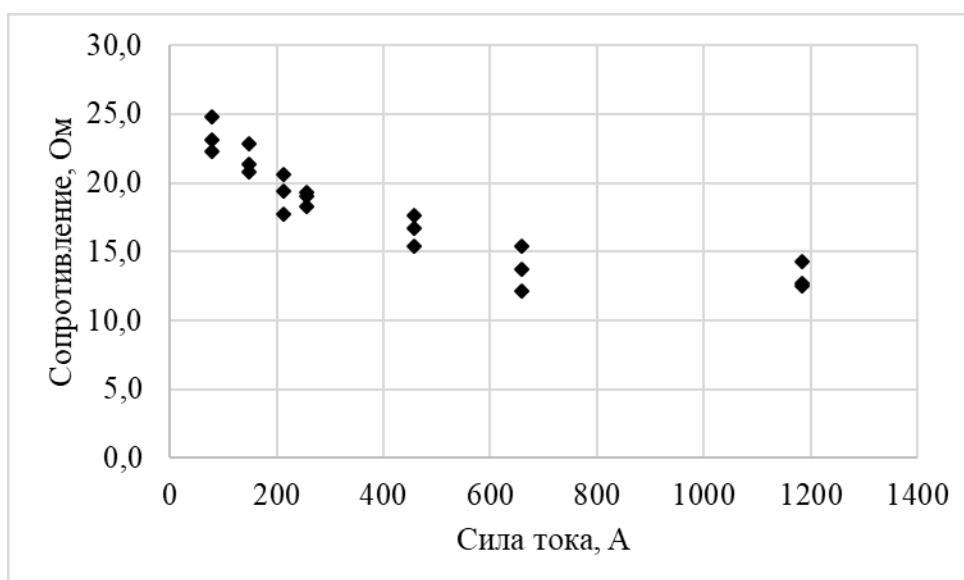


Рисунок 3.7 – Зависимость активного сопротивления ЧЗУ с плоским однослойным проводником от проходящего тока на частоте 250 кГц

### 3.2.3 Результаты для образцов частотнозависимых устройств на частотах 300 и 280 кГц

Для образца ЧЗУ с круглым проводником частота полученного сигнала при использовании конденсатора емкостью 2,2 нФ составила 300 кГц, а для ЧЗУ с плоским однослойным проводником 280 кГц. Результаты полученных значений сопротивления и токов приведены в таблицах 3.35 и 3.46.

Таблица 3.5 – Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводником на частоте входного сигнала 300 кГц

I, А	83	124	211	246	430	728	1093
R <sub>1</sub> , Ом	22,1	20	16,4	13,8	12,6	11,1	11,4
R <sub>2</sub> , Ом	20,7	19,9	14,9	13,4	12,8	12,7	11,7
R <sub>3</sub> , Ом	21,5	17,3	16,1	15,1	13,6	12,5	10,7

Таблица 3.6 – Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ с плоским однослойным проводником на частоте входного сигнала 280 кГц

I, А	78	121	221	259	443	662	1004
R <sub>1</sub> , Ом	26,2	23,7	21,7	20,2	17,6	16,7	15,8
R <sub>2</sub> , Ом	23,5	21,5	19,1	19,9	18,6	15,2	14,9
R <sub>3</sub> , Ом	24,7	22,2	20,3	20,7	19,1	17,3	16,5

График зависимости активного сопротивления от проходящего тока на данных частотах для каждого образца приведены на рисунках 3.68 и 3.79.

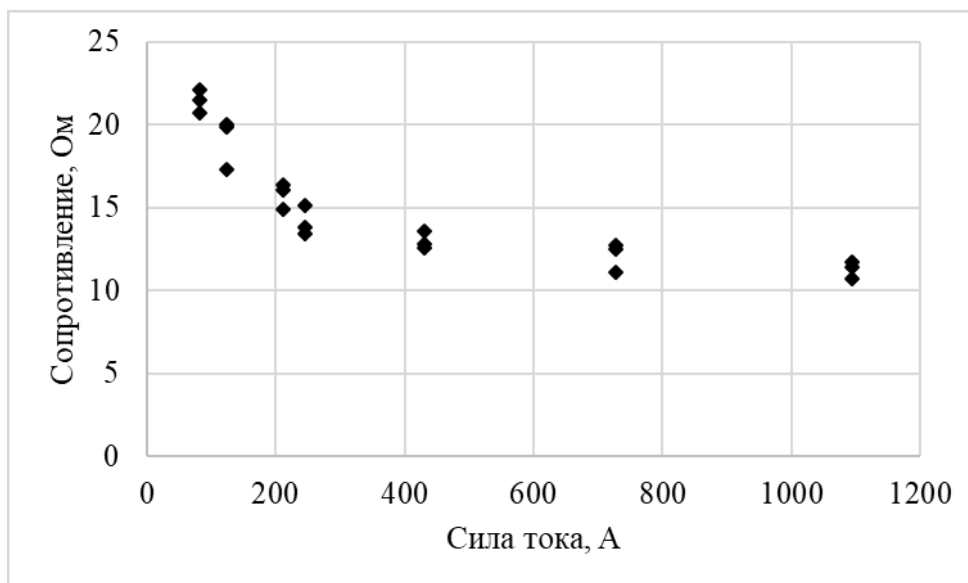


Рисунок 3.8 – Зависимость активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводником от проходящего тока на частоте 300 кГц

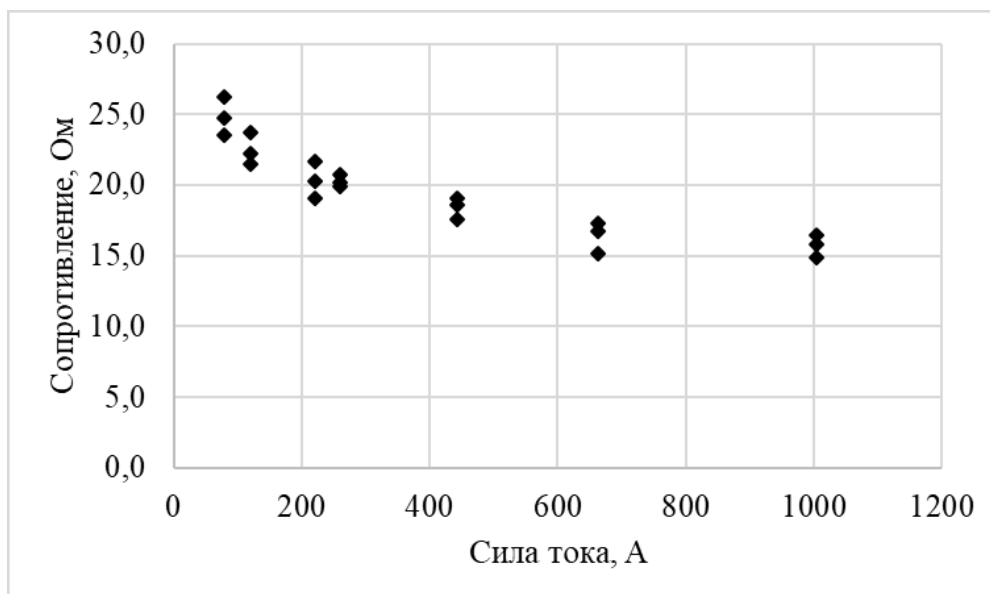


Рисунок 3.9 – Зависимость активного сопротивления ЧЗУ с плоским однослойным проводником от проходящего тока на частоте 280 кГц

### 3.2.4 Анализ полученных результатов

Полученные результаты были приведены к среднему представленные на рисунках 3.10 и 3.11.



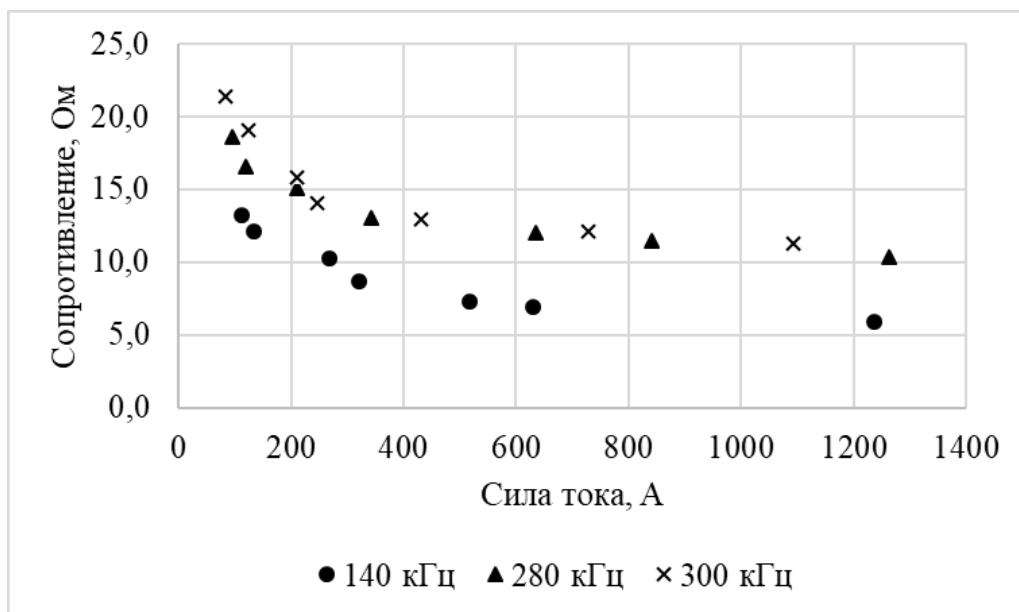


Рисунок 3.10 – Усреднённые значения активного сопротивления ЧЗУ с круглым проводником от проходящего тока на различных частотах

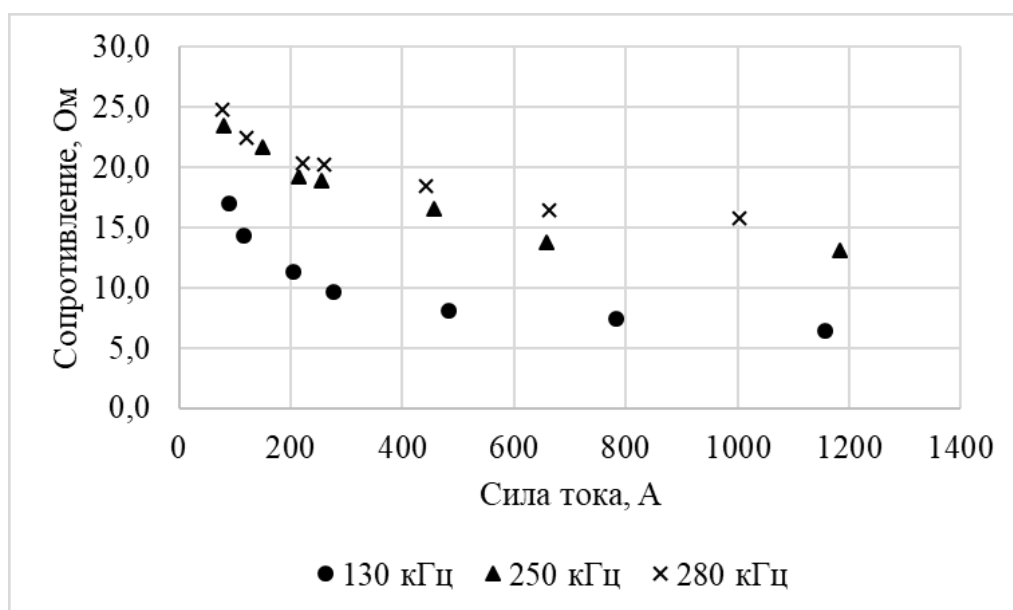


Рисунок 3.11 – Усреднённые значения активного сопротивления ЧЗУ с плоским однослойным проводником от проходящего тока на различных частотах

Сначала сопоставим результаты слаботочных и сильноточных измерений. Видно, что качественно результаты соответствуют друг другу. Сопротивление растёт с ростом частоты, значения сопротивлений близки. Точное соответствие трудно осуществить, поскольку частоты колебаний при сильноточных измерениях превышают полученные при низковольтных (слаботочных) измерениях. Поэтому

значения сопротивлений (табл. 3.1-3.4) также несколько превышают значения сопротивлений, представленных на рисунках 2.34 и 2.36.

Что касается зависимости сопротивления от тока, то можно отметить следующее. Как видно из полученных графиков, при росте тока идет снижение активного сопротивления. Падение сопротивления, с ростом тока, зарегистрированное нами может иметь две составляющие:

- падение сопротивления искры с ростом тока;
- насыщение ферромагнитного материала с ростом протекающего тока.

Ранее этот эффект был замечен при проведении сильноточных испытаний при разработке ЧЗУ [101], но в работе несмотря на достижения токов до 9 кА не было достигнуто полного перехода тока в алюминиевую часть проводника. Сопротивление образцов оставалось как минимум на 2 порядка выше сопротивления алюминиевой части проводника. Также следует отметить, что падение сопротивления при росте тока меньше в случае больших частот. Это видно из сопоставления рисунках 3.4-3.7. Возможно, это указывает на тот факт, что зона насыщения ферромагнетика при более высокой частоте не успевает вырасти до размеров толщины ферромагнитного материала за половину периода воздействия. Отсюда можно сказать, что при импульсах большой частоты, активное сопротивление защитного устройства будет оставаться достаточно высоким для обеспечения подавления высокочастотных сигналов.

Оценка же токов насыщения материала, говорит о том, что при учете сложной конструкции ЧЗУ, в отдельных участках ферромагнитного материала насыщение может начать происходить уже от токов в 30 А, однако большей части материала требуются токи порядка кА.

### **Выводы по Главе 3**

В результате работы по 3 главе:

1) показано что с ростом амплитуды тока снижается сопротивление образцов ЧЗУ, предположены причины снижения сопротивления;

2) показано, что при значениях силы тока до 1,2 кА сопротивления образцов ЧЗУ уменьшается незначительно, при этом многократно превышая сопротивление проводника без ферромагнитного материала;

3) показано, что сопротивление образцов ЧЗУ на более высоких частотах в меньшей степени зависит от значений протекающего тока.

## ГЛАВА 4 ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЧАСТОТНОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА

### 4.1 Анализ результатов опытной эксплуатации

В 2014 году на подстанции «Сугмутская» было установлено три частотно-зависимых устройства для ВЛ 110 кВ [110]. Установкой устройств планировалось достичь две цели: повышение грозозащищенности подстанции «Сугмутская» и оценка эффективности применения ЧЗУ как устройств по защите от высокочастотных перенапряжений.

Для достижения второй цели было принято решение установить систему мониторинга перенапряжения, позволяющую провести осциллографирование грозового импульса, набегающего на подстанцию со стороны ВЛ. Принципиальная схема такой системы представлена на рисунке 4.1.

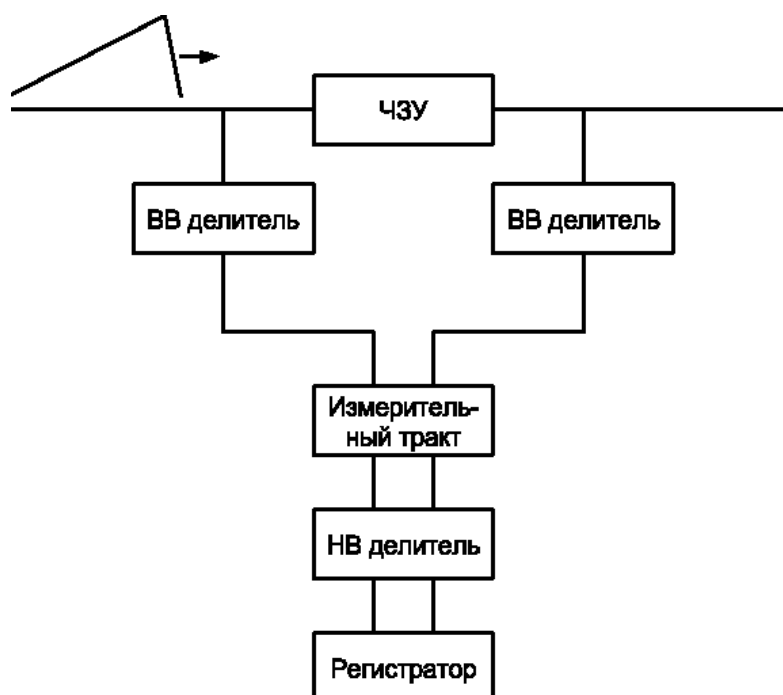


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема системы мониторинга ЧЗУ

Измерение напряжения производилось как перед ЧЗУ и после ЧЗУ, т.е. со стороны линии и со стороны подстанции. В качестве высоковольтного делителя напряжения использовалась гирлянда изоляторов. На подстанции применялись гирлянды стеклянных изоляторов ПС120 Б по 10 шт. в каждой из двух гирлянд.

Поскольку каждый из изоляторов обладает своей собственной емкостью, то гирлянда изоляторов рассматривалась как емкостный делитель напряжения. В качестве нижнего плеча такого делителя было использовано параллельное соединение имеющегося изолятора и добавленного аналогичного изолятора. Его установка также позволяла не нарушать электрической прочности гирлянды. Электрическая схема измерительного комплекса показана на рисунке 4.2.

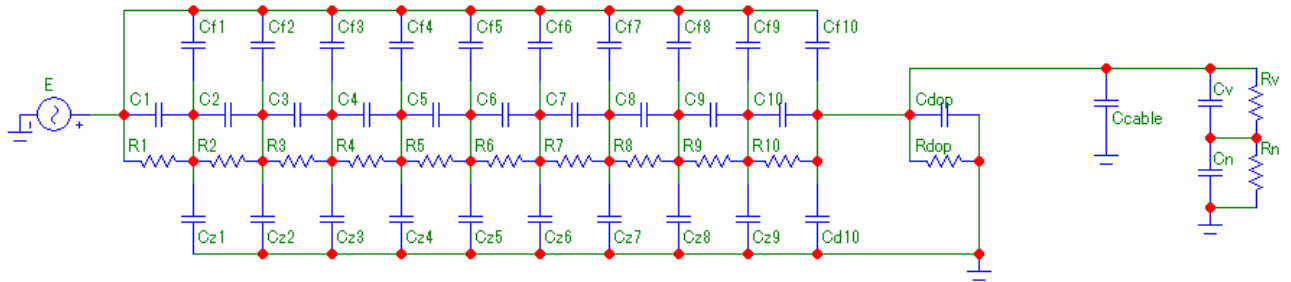


Рисунок 4.2 – Электрическая схема измерительного комплекса

Изоляторы гирлянды были представлены собственными емкостями  $C_1 \dots C_{10}$  50 пФ. Емкости  $C_{f1} \dots C_{f10}$  и  $C_{z1} \dots C_{z10}$  – паразитные емкости на фазу и на землю, 1 пФ и 5 пФ, соответственно. Емкость нижнего плеча делителя представлена емкостью  $C_{dop}$ .

В качестве измерительного тракта использовался кабель RG 58 A/U. Погонные параметры кабеля: емкость – 100 пФ/м. Длина кабеля – 75 м. Крепление кабеля к гирлянде было проложено в зонах с минимальной напряженностью поля по опоре портала в специализированных заземленных лотках.

Верхнее плечо низковольтного делителя было выполнено из высоковольтного конденсатора с электрической прочностью 2 кВ и емкостью 50 пФ. Емкость нижнего плеча - 0.015 мкФ. Для защиты от внешних факторов данный емкостной делитель был смонтирован в специальный короб. Параллельно нижнему плечу были установлены защитные диоды на напряжение 7 вольт, способные защитить оборудование от превышения напряжения. В качестве регистратора напряжения использовался программно-измерительный комплекс, собранный на основе платы сбора данных E20-10 производства компании L-Card. Для управления

платой использовался ноутбук. Программа управления комплексом написана на языке программирования Си.

С помощью разработанной системы мониторинга в течение грозового периода 2015 года были зарегистрированы множественные импульсы перенапряжения (различной природы) в 2017 году, примеры полученных импульсов представлены на рисунке 4.3.

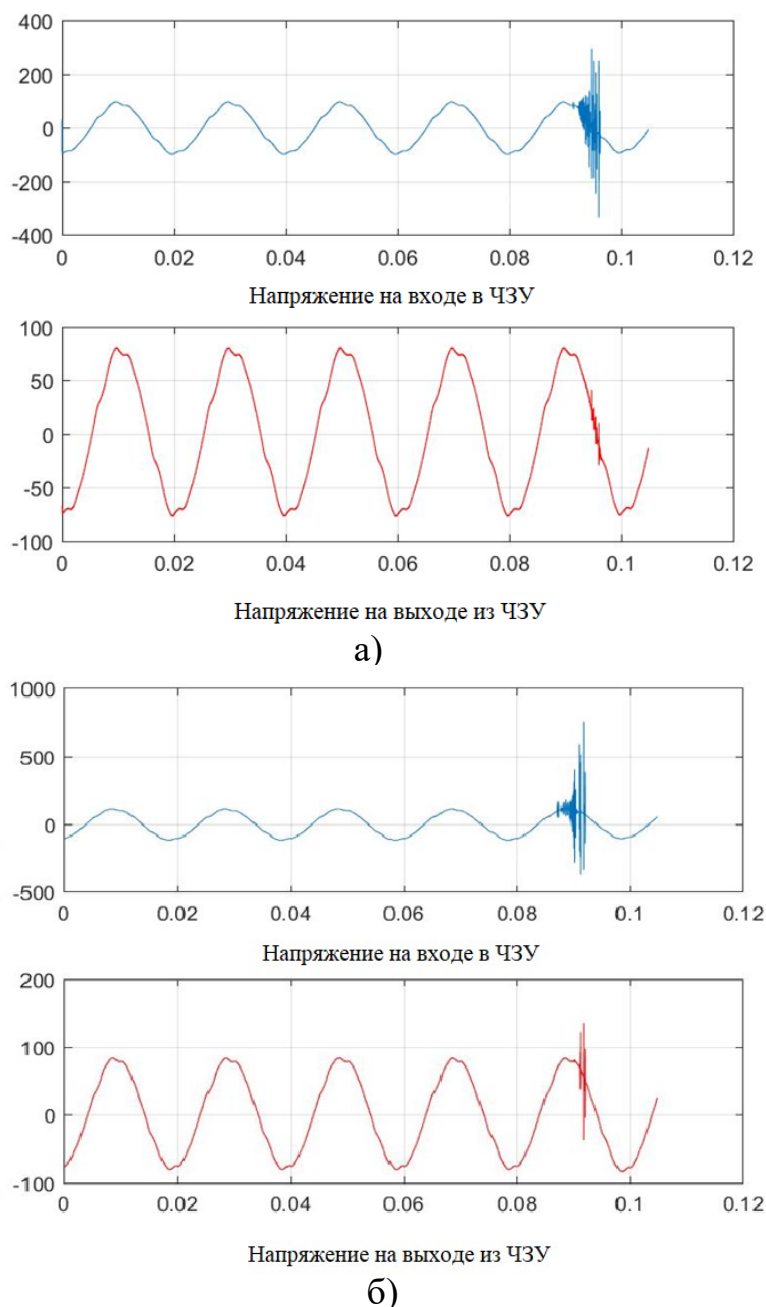


Рисунок 4.3 – Импульсы перенапряжений за грозовой сезон 2017г.: а) дата 18.05.17 в 19:25; б) дата 31.05.17 в 18:59. Синий график – напряжение на входе в ЧЗУ; красный – на выходе из ЧЗУ

Как видно на полученных примерах, ЧЗУ значительно снижает амплитуду высокочастотных импульсов (более чем в 4-5 раз), что может служить подтверждением эффективности работы ЧЗУ. Также следует отметить, что с начала опытной эксплуатации ЧЗУ на ПС «Сугмутская», не было зафиксировано ни одного случая отключения ВЛ по причинам воздействия грозových или иных перенапряжений, что может также являться косвенным подтверждением эффективности ЧЗУ, как средства борьбы с высокочастотными перенапряжениями. Однако несмотря на положительные результаты, важно отметить, что природа набегающих импульсов с ВЛ не была точно установлена. Для результатов, полученных в 2017г., предполагается что большинство импульсов перенапряжения имеют коммутационное происхождение, что оставляет открытым вопрос о эффективности воздействия ЧЗУ на полный грозовой импульс. Тем не менее, полученные результаты показывают возможность и перспективность работ по развитию защитных устройств на основе скин-эффекта.

#### **4.2 Компьютерное моделирование эффективности частотнозависимого устройства при подавлении полного импульса и импульса обратного перекрытия**

Для оценки эффективности ЧЗУ, совместно с сотрудниками Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого было проведено моделирование воздействия грозových полных и импульсов обратного перекрытия импульсов на трансформатор при использовании ЧЗУ в качестве защитного оборудования [111]. Моделирование производилось с помощью пакета приложений «COMSOL Multiphysics». В качестве источника использовался стандартный грозовой импульс 1,2/50 мкс. Трансформатор 110 кВ моделировался емкостью 7 нФ. Схема моделирования ЧЗУ показана на рисунке 4.4.

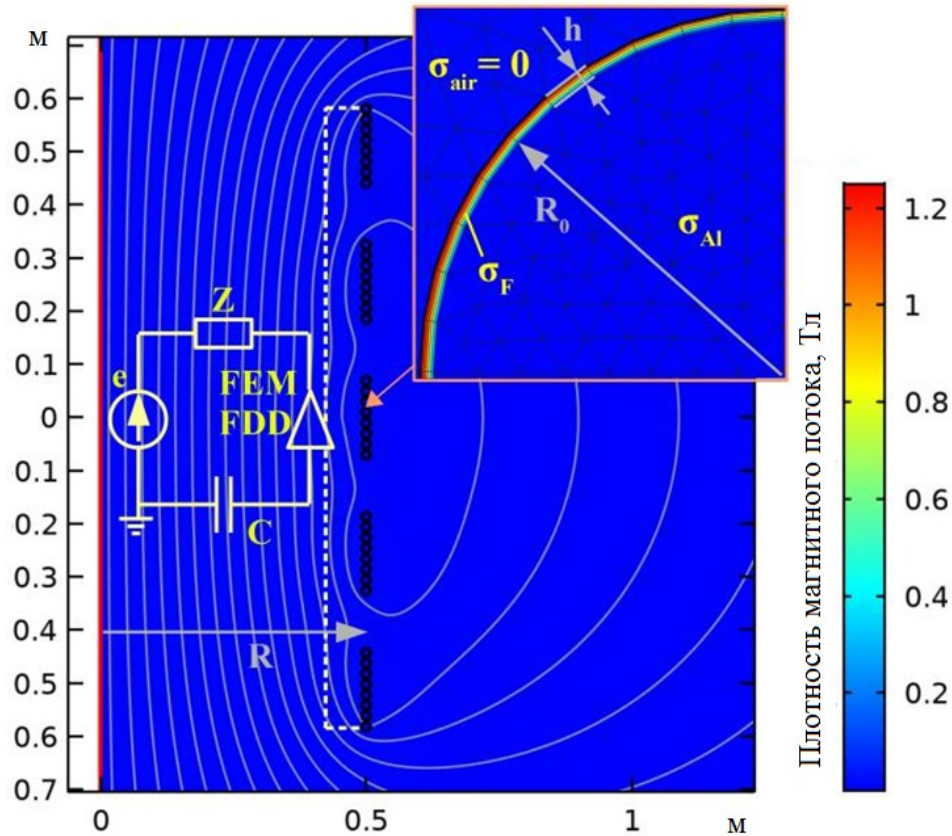


Рисунок 4.4 – Схема моделирования ЧЗУ с распределением индукции магнитного поля в момент максимального тока  $t = 3,5$  мкс:  $e$  – источник импульсного напряжения;  $Z$  – волновое сопротивление линии;  $C$  – емкость трансформатора относительно земли; FEM FDD – это конечно-элементная модель ЧЗУ;  $R_0$  – радиус алюминиевой проволоки;  $h$  – толщина ферромагнитного слоя

Моделировалось ЧЗУ для ВЛ 110 кВ с круглым проводником. Как показано на рисунке 4.4, модель ЧЗУ представляет собой соленоид, состоящий из 5 секций по 8 витков с радиусом намотки 0,5 м. На рисунке показана плотность магнитного потока вокруг одного из витков. Каждый виток состоял из алюминиевой проволоки радиусом  $R_0 = 7,9$  мм, с нанесённым на него ферромагнитным слоем толщиной 0,3 мм. Значения электропроводностей алюминия и ферромагнитного материала приняты следующие:  $\sigma_{AL} = 38 \cdot 10^6$  1/Омм и  $\sigma_F = 0.625 \cdot 10^6$  1/Омм соответственно. Для ферромагнитного слоя кривая первичного намагничивания задается данными, представленными в таблице 4.1. В модели учитывалось возможность насыщения ферромагнитного слоя, под действием больших или длительных токов.



Таблица 4.1 – Точки кривой намагничивания ферромагнитного слоя ЧЗУ

В, Тл	Н, А/м	В, Тл	Н, А/м
0	0	1.2	5100
0.33	270	1.25	7000
0.5	600	1.28	10000
0.7	1200	1.3	17958
0.9	2000	1.302	19549
1.1	3350	1.303	20349
1.15	4000	1.304	21141

Полученные результаты показали, что ЧЗУ увеличивает длительность фронта полного грозового импульса, т.е. снижает скорость нарастания и при этом мало действует на амплитуду импульса, однако устройство значительно удлиняет «короткие» импульсы и также значительно сокращает их амплитуду (рисунки 4.5 и 4.6).

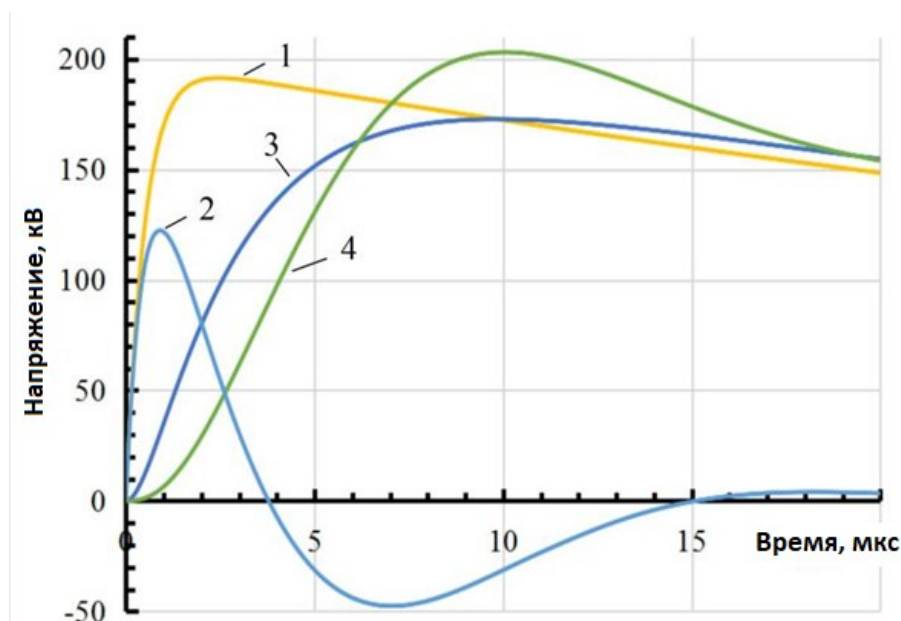


Рисунок 4.5 – Зависимости напряжения от времени: 1 – грозовой импульс; 2 – напряжение на ЧЗУ; 3 – напряжение на трансформаторе при отсутствии ЧЗУ; 4 – напряжение на трансформаторе при наличии ЧЗУ

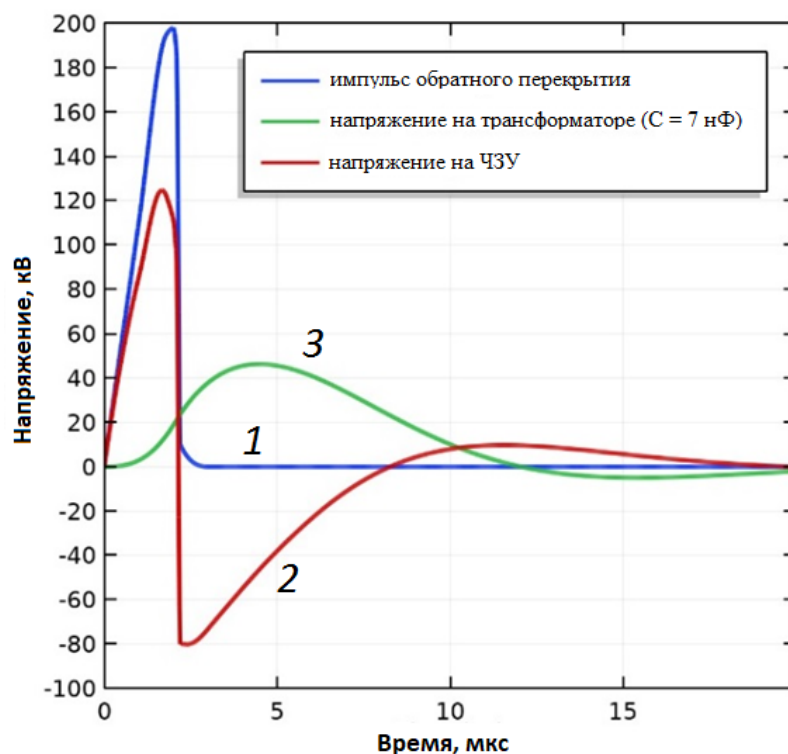


Рисунок 4.6 – Зависимости напряжения от времени: 1 – «короткий» импульсы обратного перекрытия; 2 – напряжение на ЧЗУ; 3 – напряжение на трансформаторе при наличии ЧЗУ

Как видно из рисунков ЧЗУ незначительно оказывает влияние на полный грозовой импульс: сам импульс после прохождения ЧЗУ удлиняется, немного уменьшается его крутизна, однако возрастает амплитуда импульса (рисунок 4.5(4)). В тоже время ЧЗУ значительно влияет на «короткие» импульсы: значительно сокращая амплитуду, удлиняя импульс и уменьшая его крутизну, делая его безопасным для трансформаторного оборудования и межвитковой изоляцией обмоток (рисунок 4.6(3)).

Учитывая полученные результаты, можно предположить, что наиболее эффективное будет одновременное применение ОПН и ЧЗУ: ОПН позволит срезать амплитуду импульсов перенапряжения, а ЧЗУ сможет демпфировать получившиеся крутые (срезанные и импульсы обратного перекрытия) импульсы.

### 4.3 Расчёты индуктивности частотнозависимых устройств

#### 4.3.1 Расчет индуктивности частотнозависимого устройства с круглым проводником

По результатам ранних измерений опытных образцов ЧЗУ для ВЛ 110 кВ на грозовой частоте в 300 кГц, было выявлено что частотнозависимый провод длиной 130 м имеет сопротивление  $\sim 120$  Ом. Учтя ранее полученные результаты [101] можно считать, что в первом приближении, 1 метр провода ЧЗУ имеет сопротивление 1 Ом на частоте 300 кГц. Как показало моделирование в [112], повышение активного сопротивления свыше определенных значений (более 100 Ом) незначительно влияет на снижение перенапряжений. При этом небольшое снижение активного сопротивления (в пределах вплоть до 50 Ом, т.е. двукратное снижение) без значительного снижения эффективности может снизить трудозатраты на изготовление и количество используемого материала. При этом значительное снижение активного сопротивления ухудшает снижение амплитуды импульса. При этом превалирующее значение оказывает индуктивность устройства. В связи с этим встает вопрос об поиске оптимальных параметров ЧЗУ для ВЛ 35 кВ и 110 кВ, которые бы обеспечить высокие показатели индуктивности при сохранении сопротивления ЧЗУ не менее 50 Ом, на грозовых частотах, для эффективного подавления высокочастотных перенапряжений. В дальнейшем рассмотрении конструкция ЧЗУ важно добиваться максимально возможного значения индуктивности устройства, с учетом, конечно, параметров ПС и ограничений, накладываемых распределительными компаниями.

Также следует отметить недостаточность проведённой в работе [101] оценки габаритов ЧЗУ на индуктивность. Так как жёсткость провода и наличие намотки ферромагнитного материала кусками шириной 40-60 мм, не позволяет значительно снизить диаметр устройства менее 900-800 мм, но при этом есть возможность увеличения диаметра, при достаточности пространства в месте установки. Поэтому оценку индуктивности следует вести также и при диаметре более 1 метра. Кроме того, в работе проводилась оценка индуктивного сопротивления только для ЧЗУ

110 кВ, в то время как такую оценку следует делать на каждый класс напряжения где планируется применение ЧЗУ.

Для оценки и расчета параметров индуктивности катушки применялась программа для определения индуктивности основанная на работах Robert Weaver [113]. В своих работах Robert Weaver, основываясь на методе Chester Snow [114] и учтя интеграл Джона Неймана вывел свое выражение расчета катушки с шагом (4.1). Данное выражение позволяет с высокой точностью определить индуктивность катушки при различных размерах шага катушки:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{l_w} dS_2 \int_{-S_2}^{l_w-S_2} d\varphi \frac{\cos^2 \cos(k_\varphi \varphi - \theta_0) + \sin^2 \varphi}{\sqrt{r^2 \left[ 2 - 2 \cos(k_\varphi \varphi - \theta_0) + [\varphi \sin \varphi - y_0]^2 \right]}} \quad (4.1)$$

где:  $l_w$  – длина провода катушки;

$S_1, S_2$  – расстояние от начала дуги, расстояние до конца дуги;

$\theta_0$  – угол между  $S_1$  и  $S_2$ ;

$\varphi$  – переменная, определяемая как:  $S_1 - S_2$ ;

$k_\varphi$  – переменная определяемая как  $(\cos \varphi)/r$ ;

$r$  – радиус катушки;

$y_0$  – константа определяющая начальное положение провода.

В расчёте для ЧЗУ 35 кВ использовались параметры провода А-95, диаметром 12,3 мм и А-150 с диаметром 15,8 мм для ЧЗУ 110 кВ [115]. Толщина ферромагнитного слоя не учитывалась, так как она вносит малые изменения в габаритные и индуктивные параметры катушки.

Предполагалось использование полимерной изоляции с электрической прочностью не менее 25 кВ/мм. Расчеты приводились для изоляции 3,5 мм [116], что связано с использованием изоляции такой толщины в экспериментальных образцах. Важно отметить, что для достижения требуемой электрической прочности по ГОСТ и требованиям «ФСК ЕЭС» достаточно эксплуатировать изоляцию толщиной 2 мм [116, 117].

Расстояние между центрами витков выбиралось минимальным возможным с учетом наличия изоляции, для этого учитывался только диаметры проводов и толщина изоляции между ними. Следует отметить, что полученные расчётные значения индуктивности для образца силового реактора (38 мкГн) близки к полученным в результате измерения RLC-метром (из пункта п. 2.1.7. рисунок 2.37) 42 мкГн. При этом также следует отметить, что полученная индуктивность для ЧЗУ была выше, чем индуктивность силового реактора на ~70%, что можно связать с влиянием ферромагнитного слоя, т.е. оценка индуктивности катушки, без учёта ферромагнитной материала является лишь нижней границей индуктивности ЧЗУ.

### 4.3.2 Результаты расчета частотнозависимых устройств с круглым проводником

В первую очередь было проведено сравнение зависимостей индуктивности устройств ЧЗУ от диаметра катушки. Для этого в расчетах брались 3 катушки с длиной провода 100, 75 и 50 м.

Первый расчет в качестве изменяемых параметров были приняты диаметр (D) и число витков (N). Расчеты проводятся в диапазоне  $D = 500 - 1500$  мм, связано это с технической сложностью исполнения диаметра частотнозависимого провода А-95 менее 500 мм, диаметр же более 1500 мм, уже является неудобным для эксплуатации, транспортировки и установки на ПС. Результаты расчетов представлены на рисунках 4.7, 4.8 и в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчетов при трех длинах провода катушки

D, мм	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500
100 м											
N	21	23	24	26	28	31	34	39	44	53	61
L, мкГн	924	969	951	936	920	910	893	891	837	790	698
75 м											
N	16	17	18	20	22	24	26	30	34	40	46
L, мкГн	539	600	614	626	635	638	602	587	567	555	499
50 м											
N	11	11	12	13	14	16	18	20	23	27	32
L, мкГн	323	344	311	314	314	366	349	344	322	319	293

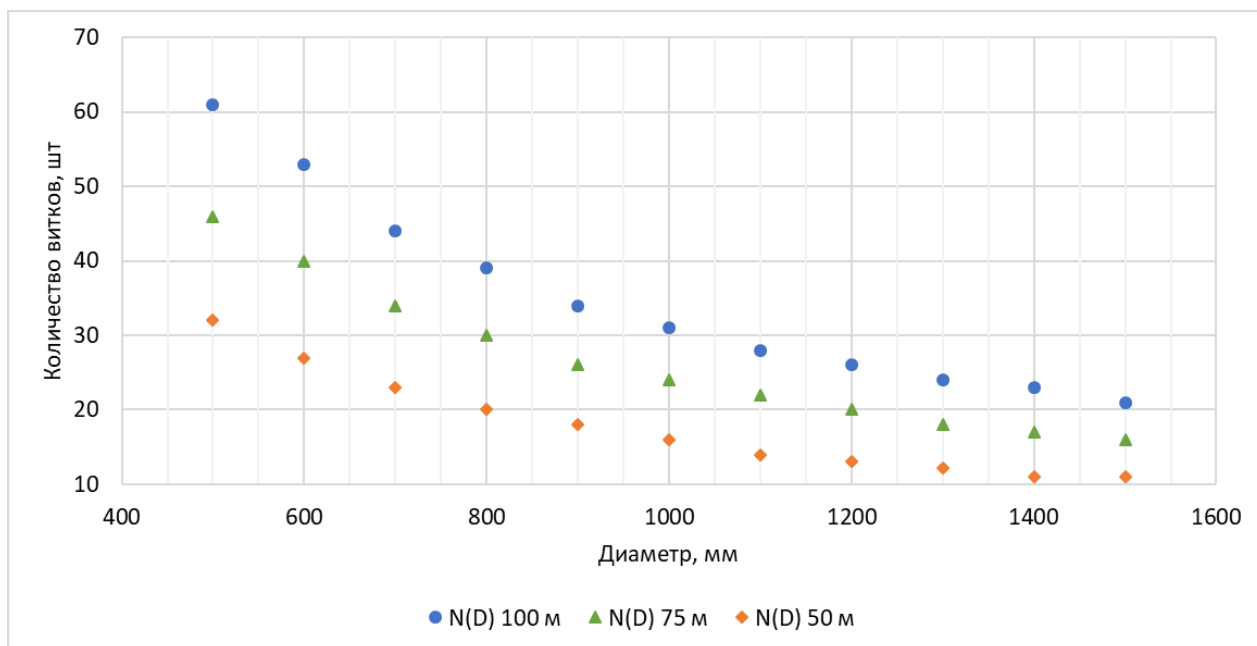


Рисунок 4.7 – Зависимость количества витков от диаметра катушки при фиксированной длине провода

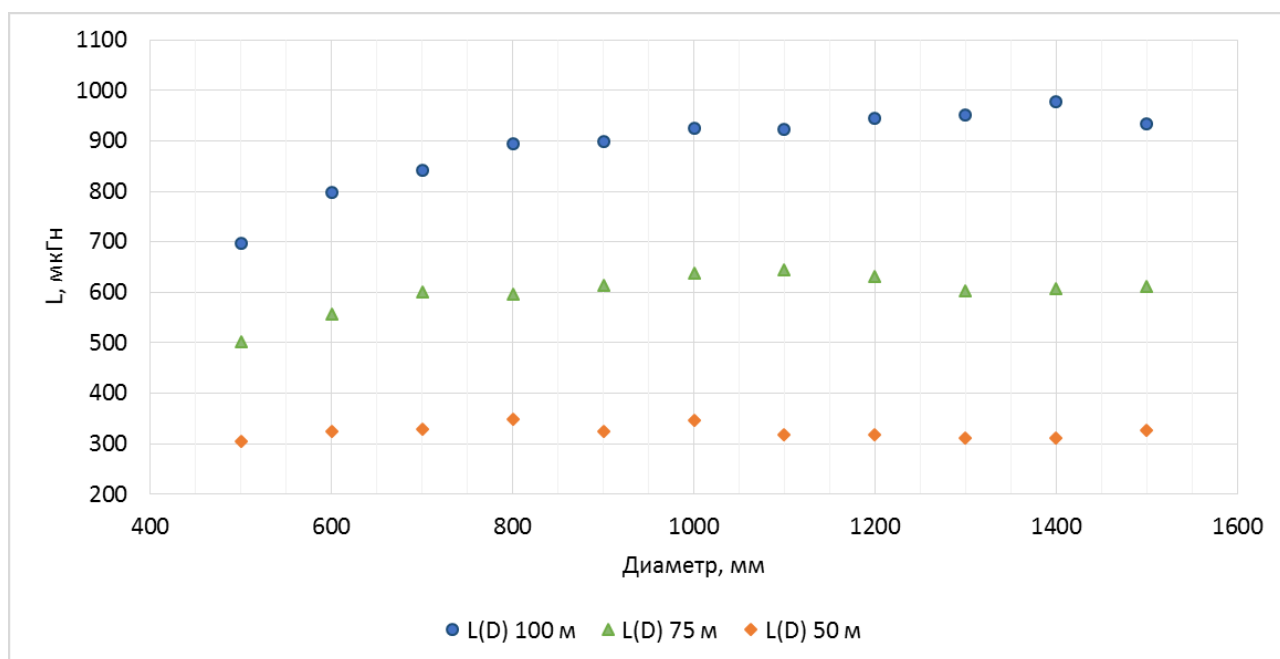


Рисунок 4.8 – Зависимость индуктивности от диаметра катушки при фиксированной длине провода

Из расчетов видно, что наибольшие значения индуктивности достигаются для всех длин в диапазонах от 1000 мм до 1400 мм. Для простоты дальнейшего сравнения, а также учитывая стандартные габариты уже используемого оборудования (например, катушек ВЧЗ) было решено остановиться на диаметре в 1000 мм. Так как снижение длины провода ЧЗУ кроме снижения активного

сопротивления, так же значительно снижает и индуктивность, то было решено дальнейшие расчеты проводить для ЧЗУ с проводом длиной 100 м.

Изменение диаметра катушки может быть важным для обеспечения габаритных требований к оборудованию на подстанциях. Зависимость для постоянного количества витков (31) приведены на рисунке 4.9 и таблице 4.3.

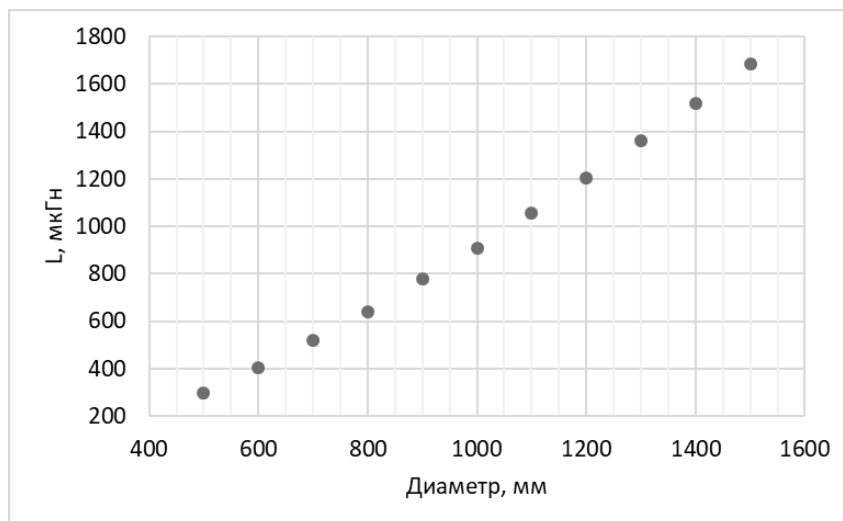


Рисунок 4.9 – Зависимость индуктивности катушки от диаметра при постоянном количестве витков

Таблица 4.3 – Результаты расчетов катушек при постоянном количестве витков разного диаметра

D, мм	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500
l <sub>пров</sub> , м	146	136	127	119	109	99	88	78	68	58	49
L, мкГн	1685	1519	1359	1204	1054	910	778	641	518	404	299

Стоит отметить, что уменьшение диаметра в 3 раза, а, следовательно, и длины катушки уменьшает индуктивность более чем в 5 раз. Это следует учитывать при проектировании катушек ЧЗУ, так как это означает что при увеличении диаметра (а, следовательно, и длины катушки при фиксированном количестве витков) индуктивность катушки будет расти быстрее активного сопротивления.

Варьируя длину провода ЧЗУ, можно менять индуктивность и активное сопротивление устройства. Это может быть полезным для обеспечения

определенных параметров линии или для соответствия требованиям релейной защиты для конкретных участков ВЛ (рисунок 4.10 и таблица 4.4).

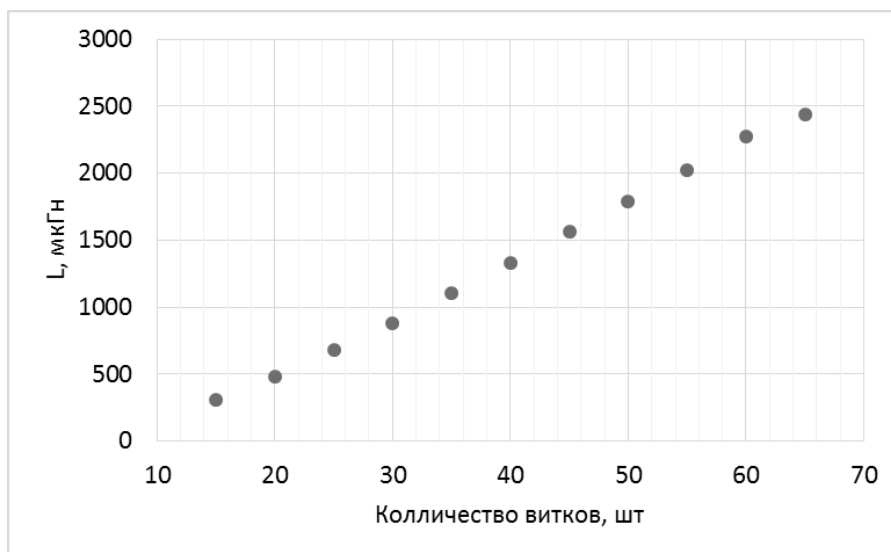


Рисунок 4.10 – Зависимость индуктивности катушки от количества витков при постоянном диаметре катушки (1000 мм)

Таблица 4.4 – Результаты расчета индуктивности катушек от количества витков при постоянном диаметре (1000 мм)

N	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15
l <sub>кат</sub> , м	208	192	176	160	144	128	112	94	80	64	48
L, мкГн	2440	2274	2024	1793	1561	1332	1102	880	677	484	309

Можно отметить, что при увеличении количества витков в 4 раза (с 15 до 60) индуктивность возросла более чем в 7 раз (с 309 до 2274 мкГн).

Еще одним параметром, на который можно оказать воздействие — это шаг намотки. Выделим при этом два случая:

- на провод нанесена изоляция конечной толщины (3 мм) (термоусадочная трубка, термоизоляционная лента и т.д.)

- на провод нанесена толстая изоляция, убирающая воздушные зазоры между витками т.е. толщина изоляции соответствует расстоянию между витками (литая изоляция, выполненная, например, компаундом).

Расчеты проводились для диаметра 1000 мм, длины провода 100 м, количестве витков 31 шт. (рисунок 4.11, таблица 4.5).



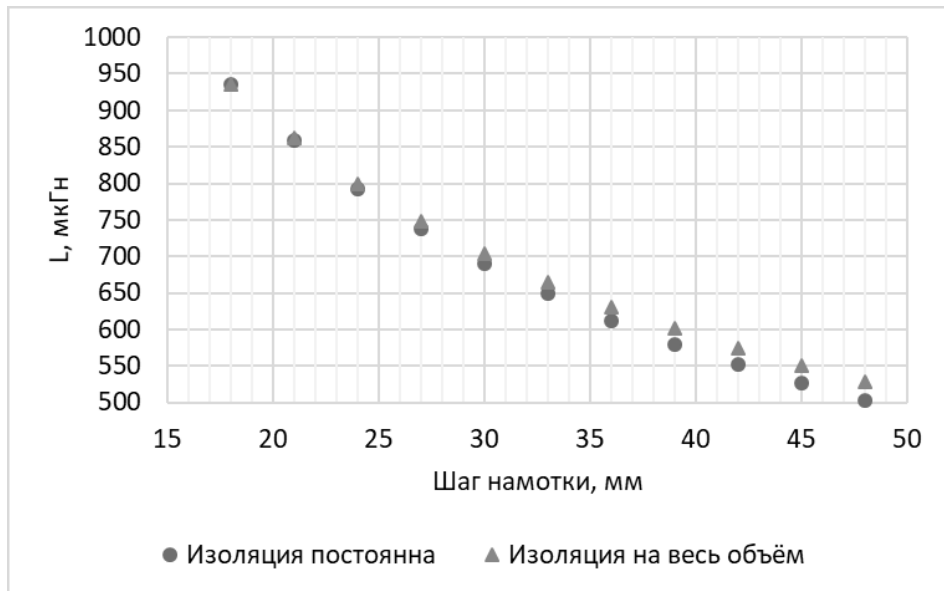


Рисунок 4.11 – Зависимость индуктивности катушки от шага намотки

Таблица 4.5 – Результаты расчетов индуктивности катушек от шага намотки

р, мм	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Толщина изоляция не меняется											
L, мкГн	936	858	793	737	690	649	612	580	552	526	502
Изоляция, литая по всему объёму (увеличивается при увеличении шага)											
L, мкГн	936	862	800	748	704	665	631	601	574	550	529

Полученные результаты показывают, что при увеличении шага намотки, разница между литой изоляцией и постоянной не превышает 5% при шаге 48 мм, то есть при 4-х кратном диаметре. Это говорит, что шаг намотки незначительно влияет на индуктивность, однако по возможности (с учетом требований к изоляции по параметрам электрической прочности) необходимо минимизировать расстояние между витками.

Также аналогичные расчеты были проведены для катушки ЧЗУ 110 кВ и их результаты приведены в приложении А. Для катушки 110 кВ расчеты проводились для проводов длиной 100, 120 и 140 метров.

Полученные результаты позволяют подбирать требуемую индуктивность ЧЗУ. Так увеличение диаметра на 20% и соответственно незначительное увеличение длины провода (20 %), могут значительно увеличить индуктивность устройства (на треть, например, для ЧЗУ 35 кВ, с 0,9 до 1,2 мкГн, а увеличение на 50 % повышает индуктивность катушки почти на 75-80 %). При этом будет

возрастать пропорционально и сопротивление на грозовой частоте, что также положительно скажется на защитных свойствах устройства.

Схожие результаты получаются при увеличении количества витков, при этом также рост индуктивности идет быстрее, чем увеличение длины катушки, а, следовательно, и веса. Так для катушки 35 кВ, при увеличении количества витков с 30 до 45 индуктивность возрастает с 880 до 1561 мкГн (более чем на 75 %), при этом уменьшение числа витков до 15 снижает индуктивность до 310 мкГн (на 65 %).

Оптимальный диапазон диаметров катушек, при которых достигаются максимальные значения индуктивностей находится в пределах 1000 – 1400 мм. Стоит заметить, что диаметр устройств может быть ограничен требованиями габаритов к оборудованию подстанции.

Шаг намотки также сильно влияет на индуктивность, если можно снизить расстояние между витками в таком случае значительно повышается индуктивность. При малом шаге, вид изоляции (толщина изоляции постоянна или изоляции заполняет весь объем между проводниками) не оказывает значительного влияния на индуктивность, а сказывается лишь при значительном увеличении шага (более 4-х диаметров проводника).

Полученные данные могут помочь определению и подбору необходимых параметров ЧЗУ для защиты оборудования, а также позволяют дать оценку габаритам, получающегося устройства при заданных параметрах.

#### **4.3.3 Расчет индуктивности частотнозависимого устройства с плоским однослойным проводником**

Был также проведен расчет индуктивности ЧЗУ с плоским однослойным проводником для сравнения с индуктивностью круглой катушки. Для этого применялось следующее выражение [118]:

$$L = \frac{2\mu_0\omega^2c}{p} \left[ \ln \frac{c}{a+r} + 0.726 + 0.2235 \frac{a+r}{c} \right] \quad (4.2)$$

где:  $\omega$  – число витков катушки;  
 $c$  – сторона катушки, м;  
 $a$  – длина катушки, м;  
 $r$  – ширина шины катушки.

Параметры и схема катушки приведены на рисунке (4.12)

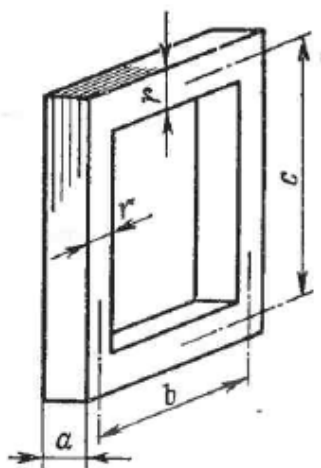


Рисунок 4.12 – Форма ЧЗУ с плоским однослойным проводником

Для расчетов применялись следующие параметры:

- катушка квадратная, со стороной 1000 мм;
- габариты шины (токопровода) 30\*3 мм, плоскость провода перпендикулярная магнитным линиям катушки, при этом толщина ферромагнитного слоя не учитывается;
- расчет проводился для трех вариантов расстояний между витками:
  - расстояние между центрами витков 6 мм (бесконечно тонкая изоляция);
  - расстояние между центрами витков 13 мм (изоляция толщиной 3,5 мм);
  - расстояние между центрами витков 20 мм (изоляция толщиной 7 мм);
- длина провода катушки равнялась 100 м;
- изоляция учитывалась внесением корректирующей поправки на изоляцию.

Поправка на изоляцию рассчитывалась по выражению (4.3):

$$\Delta L = \Delta_1 L + \Delta_2 L \quad (4.3)$$

где:  $\Delta_1 L$  – поправка, учитывающая различие между собственными индуктивностями действительных и расчетных витков;

$\Delta_2 L$  – поправка, учитывающая различие между различие взаимных индуктивностей действительных и расчетных витков.

Так как обычно  $\Delta_1 L$  имеет значительно больший порядок чем, то в расчетах  $\Delta_2 L$  можно пренебречь. Тогда  $\Delta_1 L$  можно рассчитать так:

$$\Delta_1 L = \mu_0 \omega \frac{d}{2} I \quad (4.4)$$

где:  $d$  – средний диаметр катушки (для квадратной применяется длина стороны катушки);

$I$  – величина определяемая для провода прямоугольного сечения, намотанного с шагом  $p$  в аксиальном направлении:

$$I = \ln \frac{p}{b+c} - \varepsilon(b, c) \quad (4.5)$$

где:  $\varepsilon(b, c)$  — величина, определяемая по таблицам [118], при аргументе, равном соответственно  $b/c$  (или  $c/b$ ).

Параметры  $b$ ,  $c$  и  $p$  соответствуют рисунку 4.13.

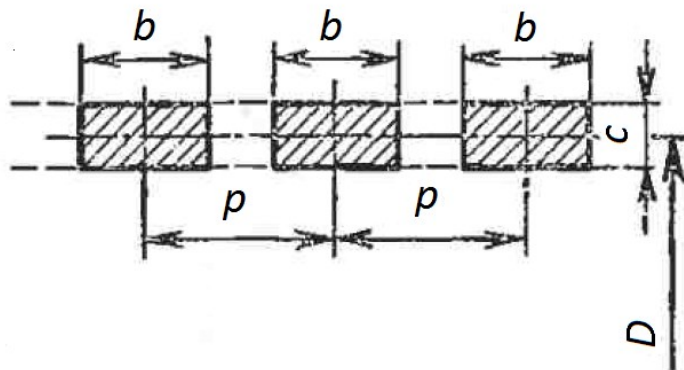


Рисунок 4.13 – Иллюстрация параметров  $b$ ,  $c$ ,  $p$  для расчетов индуктивности

#### 4.3.4 Результаты расчета частотнозависимых устройств с плоским однослойным проводником

В результате расчетов были получены следующие зависимости индуктивности от размера стороны квадрата (размера катушки), представленные в таблице 4.6 и на рисунке 4.14.

Таблица 4.6 – Зависимость индуктивности катушек при различном расстоянии между витками от размера стороны катушки и количества витков

N, шт	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
A, м	3	2	1,5	1,2	1	0,85	0,75	0,67	0,6	0,55	0,5
Расстояние между витками 6 мм											
L, мкГн	1280	1629	1898	2108	2271	2370	2491	2576	2602	2658	2632
Расстояние между витками 13 мм											
L, мкГн	1009	1229	1370	1456	1500	1491	1494	1470	1406	1363	1270
Расстояние между витками 20 мм											
L, мкГн	914	1083	1175	1214	1215	1170	1136	1080	996	930	833

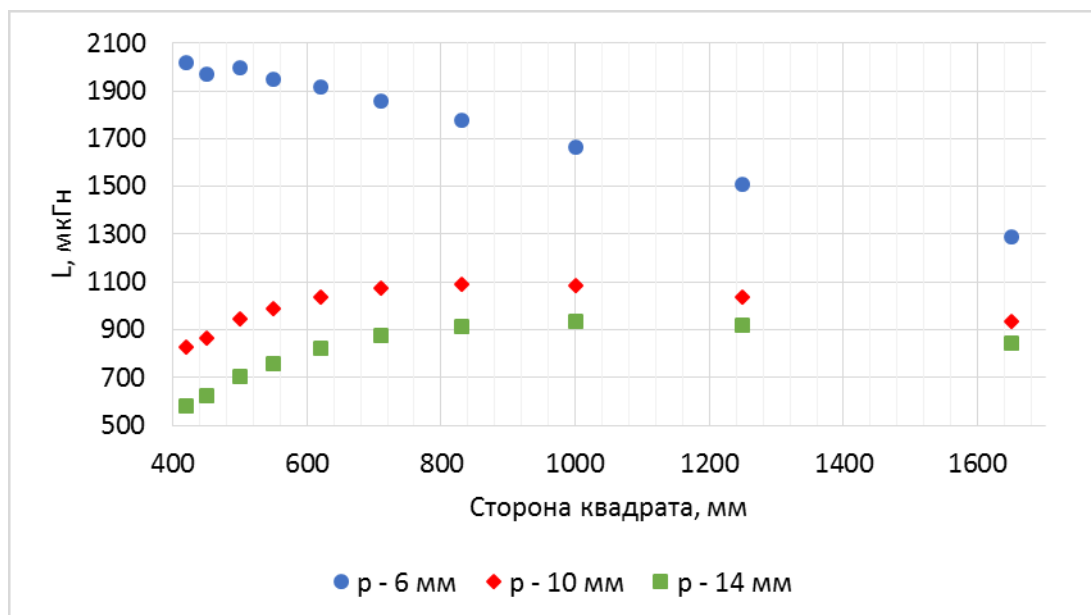


Рисунок 4.14 – Зависимость индуктивности квадратной катушки от размера стороны, для: 1 – бесконечно тонкой изоляции; 2 – изоляции 3,5 мм; 3 – изоляции 7 мм

Видно, что при наличии изоляции между проводниками ( $p$  - 6 мм), максимальная индуктивность достигается при сторонах квадратной катушки 700-1000 мм.

Результаты расчетов позволяют подбирать оптимальные размеры катушек, как квадратной, так и круглой формы, в зависимости от возможных габаритов места установки.

Важно отметить, что индуктивность квадратной катушки выше индуктивности круглой катушки при одинаковых параметрах (сторона квадратной катушки 1 м, диаметр круглой катушки 1 м) при одной и той же длине провода на 20 % (900 мкГн у круглой к 1100 мкГн у квадратной). При этом длина намотки (при расположении катушки вертикально – высота без учета арматуры) у квадратной катушки в 2 раза меньше (240 мм против 540 мм у круглой катушки). Что снижает ветровую нагрузку на устройство и делает его более компактным для транспортировки.

#### **4.4 Расчет толщины ферромагнитного слоя**

При воздействии на устройство импульса грозового перенапряжения необходимо учитывать частоту импульса из-за влияния скин-эффекта, так как эффективная толщина проводящего слоя значительно сокращается. Поэтому толщина ферромагнитного слоя не должна быть меньше толщины скин-слоя на грозовой частоте. И при этом толщина ферромагнитного слоя должна быть достаточной для того, чтобы не происходило магнитное насыщение всего материала. В связи с этим необходимо рассчитать оба случая и выбрать наибольшую толщину.

##### **4.4.1 Толщина скин-слоя при грозовом импульсе**

Определяющим фактором грозового импульса, с точки зрения частоты является длительность фронта  $T_f$  (время возрастания напряжения импульса на фронте от 0,3 до 0,9), зная которую можно оценить условный период колебания грозового импульса,  $T_y$ :

$$T_y = 1.67 \cdot 2T_\phi \quad (4.6)$$

Тогда если учесть длительность фронта стандартного грозового импульса ( $T_\phi = 1,2 \pm 0,36$  мкс) и его граничные значения (0,84 и 1,56 мкс) тогда по выражению (4.6) частота грозового импульса будет примерно в диапазоне 200-350 кГц. Соответственно толщина ферромагнитного слоя должна быть не меньше глубины скин-слоя на частоте 300 кГц.

Толщину скин-слоя можно рассчитать по следующему выражению [119]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \sigma \omega}} \quad (4.7)$$

где:  $\mu$  – магнитная проницаемость ферромагнитного материала;

$\sigma$  – проводимость ферромагнитного материала, См;

$\omega$  – круговая частота тока, рад/с.

Тогда на частоте 300 кГц, толщина скин-слоя в ферромагнитной ленте 5БДСР будет около 35 мкм, а толщина скин-слоя в алюминии около 153 мкм.

#### 4.4.2 Толщина ферромагнитного слоя для компенсации магнитного насыщения

Для оценки необходимой толщины ферромагнитного слоя для компенсации магнитного насыщения рассчитаем толщину насыщенного ферромагнитного слоя для типичных грозовых волн, используя выражение (4.8) для круглого проводника [119]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{Q\rho}{2\pi B_m r}} \quad (4.8)$$

где:  $Q$  – заряд, прошедший через двухслойный проводник за время действия импульса (интеграл от тока по времени), Кл;

$B_m$  – максимальная магнитная индукция, Тл;

$r$  – радиус проводника, м.

Наибольшее влияние на провод оказывает грозовой импульс во время достижения максимальной крутизны, то есть примерно  $\tau_{\phi}/2$  ( $\sim 0,6$  мкс). При дальнейшем течении ток распределяется также и в алюминии, тем самым значительно снижая уровень магнитного насыщения. В качестве заряда прошедшего через проводник принимается заряд, переносимый фронтом грозового импульса, условно его можно считать, как площадь треугольника, образованного амплитудой тока за время воздействия фронта. При максимальной магнитной индукции равной 1,3 Тл (по техническим условиям для ленты 5БДСР) [120], для радиусов проводов А-95 и А-150 получим следующие зависимости необходимой толщины  $\Delta$ , для различных токов (таблица 4.7):

Таблица 4.7 – Толщина скин-слоя (в мм) необходимая для компенсации магнитного насыщения

Ток, кА	10	20	30	50	100
Толщина скин-слоя для А-95 ( $r=6,15$ мм), мм	0,33	0,47	0,58	0,75	1,06
Толщина скин-слоя для А-150 ( $r=7,9$ мм), мм	0,29	0,42	0,51	0,66	0,93

В результате полученных значений в пунктах 4.4.1 и 4.4.2. делаем вывод что толщина ферромагнитного слоя должна быть хотя бы 0,3 мм. Данное решение было принято на основании следующих предположений:

- максимальная крутизна (а значит и максимальная частота) достигается примерно в середине фронта импульса (между  $0,3U$  и  $0,9U$ ), соответственно именно в это время важно наиболее эффективное срабатывание в ферромагнитной среде;
- большая часть тока (при насыщении внешних слоев материала) начинает протекать по насыщенному слою, тем самым уменьшая прохождение через ненасыщенный материал;
- сопротивление насыщенной части (слоев) остается все равно высоким относительно проводника, так как определяется степенью упорядоченности ферромагнитного материала;



- сам процесс прохождения больших токов высоких частот (~ порядка сотен кГц) скоротечен, а значит даже при максимальных амплитудах, воздействие на ферромагнитный материал будет кратковременным (микросекунды и доли микросекунд);
- увеличение толщины ферромагнитного материала усложнит техпроцесс изготовления устройств и повысит количество необходимого материала.

## 4.5 Расчет тепловой устойчивости частотнозависимых устройств

### 4.5.1 Тепловая устойчивость частотнозависимых устройств под действием тока короткого замыкания

Ток короткого замыкания имеет малую частоту т.е. не затрагивает ферромагнитный слой и протекает по всей толщине проводника. Однако имеет большую амплитуду тока до 35 кА. Тогда для 2 случаев (провод для ВЛ 35 кВ и ВЛ 110 кВ) можно оценить рост температуры из следующего выражения:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \frac{j^2}{\sigma} \quad (4.9)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/кг\*К;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$dT/dt$  – скорость нарастания температуры, К/с;

$j$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – проводимость, См/м.

Плотность тока определим делением тока короткого замыкания на площадь сечения проводника  $S$ ,  $j = I_{кз}/S$ . Тогда конечное выражение для расчета скорости нагрева будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I_{кз}^2}{S^2 \sigma c \rho} \quad (4.10)$$

Для ВЛ 35 кВ примем  $S = 95 \text{ мм}^2$ , для 110 кВ  $S = 150 \text{ мм}^2$ . С учетом что плотность алюминия  $2,7 \text{ г/см}^3$ , удельная теплоемкость  $930 \text{ Дж/кг*К}$ , а проводимость  $3,6 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ . [120].

Тогда подставляя численные данные в выражение включая ток КЗ равный, например, 30 кА, можно получить, скорость нарастания температуры в алюминии (таблица 4.8)

Таблица 4.8 – Скорость нарастание температуры при токе КЗ в алюминии

	35 кВ	110 кВ
dT/dt, К/с	100	70

Так как требований для ЧЗУ по термической устойчивости ещё нет, то в связи со схожестью конструкции целесообразно сравнить тепловую устойчивость ЧЗУ и требуемой для ВЧЗ. Так по СТО 56947007-33.060.40.125-2012 [121] ВЧЗ должен выдержать температуру в течении 1 секунды не менее  $250^\circ\text{C}$ . Такая же температура устанавливается для фазных проводов (элемент конструкции ЧЗУ). В худшем случае при использовании ЧЗУ 35 кВ, за 1 секунду нагрев устройства не превысит  $200^\circ\text{C}$ ., что в свою очередь не нарушает целостность и прочностные свойства проводника [122] 00120, а также не вызывает изменения структуры ферромагнитной ленты [120].

#### 4.5.2 Тепловая устойчивость под действием грозových импульсов

Под действием грозových импульсов в связи с тем, что основным проводником высокочастотных импульсов будет в основном ферромагнитный слой, то именно его необходимо учитывать в первую очередь. Тогда площадь проводника можно оценить зная диаметр провода и толщину ферромагнитного слоя, принятого в п. 4.4. (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Площадь сечения по которой идет грозовой ток для проводов А-95 (35 кВ) и А-150 (110 кВ)

Материал	35 кВ	110 кВ
$S_{\text{БДСР}}$ , $\text{мм}^2$	12	15

Теперь пользуясь выражением (4.10) можно рассчитать степень нагрева ферромагнитного материала под действием различных токов молний.

Полученные скорости нарастания температуры для наиболее значащих значений токов молний ( $I_m$ ) [123], представленные в таблице 4.10:

Таблица 4.10– Скорость нарастания температуры в ферромагнитном слое для проводов А-95 (35 кВ) и А-150 (110 кВ)

$I_m$ , кА	10	20	30	50	100
dT/dt (35 кВ), К/с	332	1329	2990	8307	33227
dT/dt (110 кВ), К/с	213	851	1914	5316	21265

Как видно, нагрев ферромагнитного слоя даже под действием тока 100 кА получается незначительным, при длительности грозового импульса около 50 мкс. Применяемый ферромагнитный материал (5БДСР) допускает длительный нагрев до 240°C без изменения своих свойств [120, 124]. Получается, что под действием срезаемых и импульсов обратного перекрытия, которые имеют длительность значительно меньше полного грозового импульса, нагрев провода ЧЗУ будет еще более незначителен, а также не будет происходить изменений свойств, под действием температуры, как проводника, так и ферромагнитного материала.

#### 4.6 Расчет электродинамической устойчивости катушек частотнозависимых устройств

Под действием токов короткого замыкания в ЧЗУ будут создаваться электродинамические усилия, которые могут вызывать деформацию элементов ЧЗУ. В связи с этим необходим расчет электродинамической стойкости ЧЗУ для 3 случаев: ЧЗУ с круглым проводником на 35 кВ и 110 кВ и ЧЗУ с плоским однослойным проводником на 35 кВ.

При расчете ток принимался равным току короткого замыкания. В свою очередь, расчеты производились для токов КЗ: 1, 2, 5, 10, 20 и 35 кА.

Под действием тока короткого замыкания будут появляться радиальные силы, действующие на витки и стремящиеся увеличить их периметр, т.е. разорвать виток (рисунок 4.15) [125].

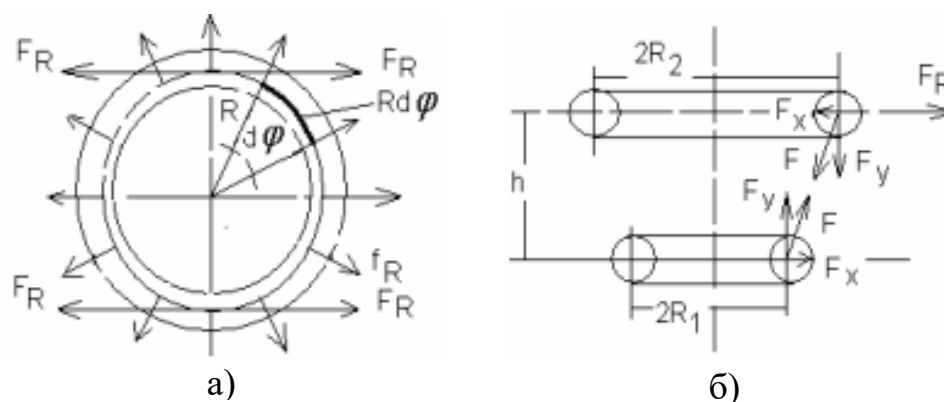


Рисунок 4.15 – Электродинамические силы в кольцевых витках

При отсутствии деформации витка силы, действующие на виток круглого сечения, будут:

$$F_R = i^2 10^{-7} \left( \ln \frac{8R}{r} - 0.75 \right) \quad (4.11)$$

где:  $r$  – радиус провода, м;

$R$  – радиус катушки, м;

$i$  – ток, протекающий по витку, А.

Тогда для круглой катушки ЧЗУ 110 кВ, диаметром 1 м, диаметром провода 16 мм, с количеством витков 40 штук можно получить следующие значения разрывающей силы (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Сила, действующая на катушку ЧЗУ 110 кВ, в радиальном направлении, при различных токах КЗ (для одного витка и для всей катушки)

$I, \text{кА}$	1	2	5	10	20	35
$F_R, \text{Н}$	1	2	14	55	219	669
$F_{R40}, \text{Н}$	25	87	546	2186	8743	26777

Для катушки ЧЗУ 35 кВ, диаметром 0,7 м, диаметром провода 12 мм, количеством витков 30 штук (таблица 4.12). Диаметр 0,7 метр взят, для учета

повышенной нагрузки, так как при уменьшении диаметра, разрывающая сила увеличивается.

Таблица 4.12 – Сила, действующая на катушку ЧЗУ 35 кВ, в радиальном направлении, при различных токах КЗ (для одного витка и для всей катушки)

I, кА	1	2	5	10	20	35
$F_R$ , Н	1	2	13	54	216	661
$F_{R30}$ , Н	16	65	405	1619	6475	19829

Конструкция ЧЗУ предполагает наличие внешних планок, которые фиксируют витки и позволяют производить установку ЧЗУ по месту эксплуатации. Так как действие витков будет только на внешние планки тут возможны 2 случая:

1. Жесткие планки, не деформируются, соответственно основную нагрузку принимают на себя болты, скрепляющие внешние и внутренние планки. Так как конструкция ЧЗУ позволяет менять конфигурацию, в том числе и менять количество болтов на 1 планке, за счет увеличения количества витков в одном «пакете», то имеет смысл произвести расчет для случаев 4 случаев, когда на планке 3, 4, 5 и 6 болтов, самих планок в конструкции используется 8. Соответственно количество болтов будет 24, 32, 40 и 48 шт. Тогда нагрузка на один болт можно посчитать (таблицы 4.13 и 4.14).

Таблица 4.13 – Нагрузка на один болт в конструкции ЧЗУ 110 кВ

I, кА	1	2	5	10	20	35
$F_{\text{прив}}(24)$ , Н	1	4	23	91	364	1116
$F_{\text{прив}}(32)$ , Н	1	3	17	68	273	837
$F_{\text{прив}}(40)$ , Н	1	2	14	55	219	669
$F_{\text{прив}}(48)$ , Н	1	2	11	46	182	558

Таблица 4.14 – Нагрузка на один болт в конструкции ЧЗУ 35 кВ

I, кА	1	2	5	10	20	35
$F_{\text{прив}}(24)$ , Н	1	3	17	67	270	826
$F_{\text{прив}}(32)$ , Н	1	2	13	51	202	620
$F_{\text{прив}}(40)$ , Н	0,4	2	10	40	162	496
$F_{\text{прив}}(48)$ , Н	0,3	1	8	34	135	413

Как видно нагрузка даже при минимальном количестве болтов не превышает 1,5 кН, что меньше даже предела текучести болтов М10, класса прочности 4,6 [126].

2. Планки гибкие и могут деформироваться под действием нагрузки. В таком случае поперечная сила будет компенсироваться только возникающим напряжением в алюминиевом проводнике. Напряжение проводника площадью  $S$  считается по выражению:

$$\sigma = \frac{F_R}{S} \quad (4.12)$$

Тогда для витков ЧЗУ 110 кВ с проводом А-150, ЧЗУ 35 кВ с А-90 и ЧЗУ с плоским однослойным проводником, можно вычислить напряжение (таблица 4.15).

Таблица 4.15 – Напряжение в алюминии в катушках ЧЗУ

I, кА	1	2	5	10	20	35
ЧЗУ с круглым проводником 110 кВ						
$\sigma$ , МПа	0,004	0,01	0,09	0,36	1,46	4,46
ЧЗУ с круглым проводником 35 кВ						
$\sigma$ , МПа	0,01	0,02	0,15	0,60	2,40	7,34
ЧЗУ с плоским проводником 35 кВ						
$\sigma$ , МПа	0,01	0,03	0,18	0,74	2,95	6,64

При этом предел прочности алюминия должна составлять по ГОСТ не менее 70 Мпа [127].

Полученные результаты показывают устойчивость ЧЗУ к действиям электродинамических сил. Причем запас предела прочности значительный и позволит выдерживать токи и более 35 кА, что может означать возможность устройств выдерживать нагрузки как токов короткого замыкания, так и токов молнии.

#### Выводы по Главе 4

В результате работы по 4 главе:

1) проведен анализ результатов опытной эксплуатации ЧЗУ для ВЛ 110 кВ в период с 2015 – 2017 года, показавший высокую эффективность ЧЗУ;

2) проведенное моделирование показало высокую эффективность применения ЧЗУ для подавления высокочастотных перенапряжений большой крутизны (крутые и срезанные импульсы), при этом показано малое влияние на полные грозовые импульсы;

3) получены зависимости индуктивности катушки ЧЗУ от различных параметров конструкции (как для круглого, так и для плоского проводников), позволяющие управлять индуктивностью;

4) подтверждена устойчивость конструкции ЧЗУ для ВЛ 35 и 110 кВ, к нагреву под действием токов короткого замыкания и токов грозового полного импульса и к воздействию электродинамических сил;

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы получены основные результаты:

1. проведен анализ результатов мониторинга работы ЧЗУ в условиях опытной эксплуатации на подстанции «Сугмутская», который показал высокую эффективность защиты от высокочастотных перенапряжений;

2. показана высокая эффективность ЧЗУ в подавлении срезанных и импульсов обратного перекрытия импульсов путем моделирования в системе «Comsol Multiphysics»;

3. проведено сравнение различных способов повышения активного высокочастотного сопротивления ЧЗУ и показано, что управление формой проводника является наиболее эффективным способом повышения активного сопротивления защитного устройства;

4. показано что с ростом амплитуды тока снижается активное сопротивление образцов ЧЗУ, при токах до 1,2 кА сопротивление падает незначительно, многократно превышая сопротивление проводника без ферромагнитного материала;

5. показано, что активное сопротивление образцов ЧЗУ на более высоких частотах в меньшей степени зависит от значений протекающего тока;

6. предложен плоский однослойный профиль проводника ЧЗУ и показана высокая эффективность применения новой формы в конструкции. На основании применения этого профиля предложена новая конструкция ЧЗУ с плоским однослойным проводником с повышенной индуктивностью, активным сопротивлением и меньшими массогабаритными параметрами, которая может быть использована для воздушных линий 35 кВ;

7. проведены расчёты и анализ влияния геометрических параметров частотнозависимого устройства, позволяющие провести оптимизацию конструкции устройства для воздушных линий 35 кВ и 110 кВ. Данные результаты применены в проекте реконструкции и модернизации подстанции ПС 220/110/35/6 кВ «Факел» филиала «Нижевартовские электрические сети» АО «Россети-Тюмень», что подтверждается актом внедрения.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысков Ю.И., Антонова Н.П., Максимов В.М., Демина О.Ю. Проблемы применения нелинейных ограничителей перенапряжения 110-750 кВ // Электрические станции. – 1988. – № 9. – С. 43-47.
2. Ефимов Б.В., Селиванов В.Н. Волны перенапряжений на оборудовании подстанции при ударах молнии за пределами защищенного подхода // Труды Кольского научного центра. – 2018. – № 3-16(9). – С. 7-23.
3. ГОСТ Р 52725–2007. Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. с 01.01.2008 – Москва: Стандартинформ. – 2007. – 38 с.
4. Liljestränd L., Lindell E. Efficiency of surge arresters as protective devices against circuit-breaker-induced overvoltages // IEEE Transactions on power delivery. – 2016. – Vol. 31. №. 4. – P. 1562-1570.
5. Costea M., Nicoara B. The Effects of Lightning Induced Overvoltages on Low Voltage Power Networks // IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd. – Bucharest, Romania. – 2009. – P. 1-6.
6. Aravanis T.I., Pyrgioti E.C., Gonos I.F. Lightning-induced Overvoltages in the Hellenic Electricity Distribution Network // 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE Lightning-induced Overvoltages in the Hellenic Electricity Distribution Network). – Chengdu, China. – 2016. – P. 1-4.
7. Дмитриев М.В. Воздушные линии 110-220 кВ. Защита изоляции от грозовых перенапряжений // Новости Электротехники. – 2008. – № 6 (54). – С. 2-5.
8. Hayashi T., Mizuno , Naito K. Study on Transmission-Line Arresters for Tower With High Footing Resistance // IEEE Transactions on power delivery. – 2008. – Vol. 23. № 4. – P. 2456-2460.
9. Адамьян Ю.Э., Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Коровкин Н.В., Кулигин П.И., Монастырский А.Е., Титков В.В. Зависимость уровня перенапряжений ОПН разных классов напряжения от параметров заземляющих

устройств. Эксперимент и моделирование // Труды Кольского научного центра РАН. – 2016 – № 13. – С. 29-38.

10. Данилин А.Н., Селиванов В.Н., Прокопчук П.И., Колобов В.В., Куклин Д.В. Экспериментальные исследования волновых процессов на шинах подстанций класса напряжений 110-150 кВ // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 5. – С. 29-38.

11. Брыкин В.П. К оценке крутизны грозовых волн, набегающих на подстанции при обратных перекрытиях изоляции ВЛ // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № S2 (9). – С. 38-41.

12. Mayer F. Radio frequency interference suppressor cable having resistive conductor and lossy magnetic absorbing material. United States patent US 4301428, 17.11.1981.

13. Person H.R., Veik T.L. Magnetic variable resistor, United States patent US 5235311, 10.09.1993.

14. Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Лавров Ю.А., Лопатин В.В., Брыкин В.П., Коробенкова А.Ю. ФГБОУ ВО НГТУ АО «Тюменьэнерго» Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений. Патент № 132633 РФ. – № 2013120271/07 Заявл. 30.04.2013; Оpubл. 20.09.2013, Бюл. № 26.

15. Суворов Д.В., Буваков С.Ю., Гололобов Г.П., Тарабрин Д.Ю., Петров П.М. ФГБОУ ВО РГРТУ Частотозависимый индуктивно-резистивный элемент на основе композитных проводников для защиты от импульсных перенапряжений и высокочастотных помех. Патент № 169173 РФ. – № 2016117718 Заявл. 04.05.2016; Оpubл. 09.03.2017, Бюл. № 7.

16. Kolano R., Kolano-Burian A., Polak M., Szynowski J. Application of Rapidly Quenched Soft Magnetic Materials in Energy-Saving Electric Equipment // IEEE Transactions on magnetics. – 2014. – Vol. 4. № 50. – P. 1-4.

17. Гашимов А.М., Мехтиев Т.Р., Бабаева Н.Р. Возможности ограничения высокочастотных перенапряжений // Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția I, 21-24 septembrie – 2005. – Chișinău, Republica Moldova. – P. 265-270.

18. Боровицкий В.Г., Овсянников А.Г. Отключение отпаечных линий ВЛ 110 кВ // Новости Электротехники. – 2012. – № 5(77). – С. 2-4.
19. Christodoulou C.A., Ekonomou L., Gonos I.F., Papanikolaou N.P. Lightning protection of PV systems // Energy Systems – 2016. – Vol. 7. № 3 – P. 469-482.
20. Брыкин В.П. Актуальность грозозащиты продольной изоляции силовых трансформаторов в регионах с грунтами низкой проводимости // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 1(8). – С. 38-47.
21. Брыкин В.П., Лопатин В.В., Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Лавров Ю.А., Ломан В.А., Скрыбина Е.А. Проблемы грозоупорности линий электропередачи и подстанций в районах Крайнего Севера // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 3(6). – С. 30-37.
22. Ефимов Б.В., Халилов Ф.Х., Новикова А.Н., Гумерова Н.И., Невретдинов Ю.М. Актуальные проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн, набегающих с воздушных линий // Труды Кольского научного центра РАН. – 2012. – № 1. – С. 7-25.
23. Русских П.О., Ярошевич В.В., & Карпов А.С. (2016). Основные причины сокращенного срока службы силовых трансформаторов. Труды Кольского научного центра РАН, (5-13 (39)), 72-84
24. Tomomi N., Takeshi Y., Azuma M., Eiichi Z., Masaru I. Observation of Current Waveshapes of Lightning Strokes on Transmission Towers // IEEE Transactions on power delivery. – 2000. – Vol. 15. № 1. – P. 429-435.
25. Mikropoulos P.N., Tsovilis T.E. Estimation of Lightning Incidence to Overhead Transmission Lines // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25. № 3. – P. 1855-1865.
26. Mikropoulos P.N., Tsovilis T.E. Statistical method for the evaluation of the lightning performance of overhead distribution lines // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – Vol. 20. № 1. – P. 202-211.
27. Holmquist J.R., Jones R.W. Reducing the effects of lightning in cogeneration plants // IEEE Industry Applications Magazine. – 2001. – Vol. 7. № 5. – P. 20-29.

28. Takami J., Okabe S. Observational Results of Lightning Current on Transmission Towers // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. № 1. – P. 547-556.

29. Wang J., Mi, Li X., Zhang Cai. Effects of Surge Protective Devices on Overhead Power Line Induced Voltage from Natural Lightning // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55. № 6. – P. 1201-1209.

30. He , Wang X., Yu Z., Zeng R. Statistical Analysis on Lightning Performance of Transmission Lines in Several Regions of China // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30. № 3. – P. 1543-1551.

31. Aranguren D., Soto E.A., Pérez, Torres H. Lightning Voltages Measurements on an Energized Distribution Line in Colombia // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – Vol. 64. № 4. – P. 1219-1224.

32. Soares A., Schroeder M.A., Visacro S. Transient voltages in transmission lines caused by direct lightning strikes // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. № 2. – P. 1447-1452.

33. Костенко М.В., Половой И.Ф., Розенфельд А.Н. Роль прорывов молнии на провода мимо тросов для грозозащиты линий высших классов напряжения // Электричество. – 1961. – № 4. – С. 20-28.

34. ГОСТ Р 55194-2012 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции – Введ. с 26.11.2012 – Москва: Стандартинформ. – 2015 – 57 с.

35. ГОСТ 1516.2 – 97 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции – Взамен ГОСТ 1516.2 – 76 – Введ. с 25.04.1997 – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 2000. – 35 с.

36. Mahmood F., Lehtonen M., Nehmdoh S.A. Probabilistic Risk Assessment of MV Insulator Flashover Under Combined AC and Lightning-Induced Overvoltages // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30. № 4. – P. 1880-1888.

37. Cervantes M., Kocar I., Montenegro A., Goldsworthy D.L., Tobin T., Mahseredjian J., Ramos R., Martí J.R., Noda T., Ametani A., Martin C. Simulation of Switching Overvoltages and Validation With Field Tests // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – Vol. 33. № 6. – P. 2884-2893.

38. Alstom Grid Worldwide Contact Centre. NETWORK PROTECTION & AUTOMATION. Alstom Grid, 2011. – № 16-3 – pp.508.

39. Florkowski M., Furgal J. Terminal based recognition of resonance overvoltages in transformer windings // Proceedings of the 16th Intern. symp. on High Voltage engineering. – Innes House, Johannesburg. – 2009. – Vol. Paper A – 1. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.- опт. диск (CD-ROM).

40. Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V. A Study of Transferred Overvoltages on the Secondary Windings of Station Service Voltage Transformers // Russian Electrical Engineering. – 2018. – № 89. – P. 313-317.

41. Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Под ред. проф., д.т.н. В.Я. Ушакова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 488 с.:ил.

42. Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V., Kubatkin M.A., Nikulov I.I. Resonance Overvoltages in Primary Winding of a Station Service Voltage Transformer // Russian Electrical Engineering. – 2018. – № 89. – P. 490-495.

43. Kumar U., Hegde V., Shivanand V. Preliminary Studies on the Characteristics of the Induced Currents in Simple Down Conductors Due to a Nearby Lightning Strike // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2006. – Vol. 48 № 4. – P. 805-816.

44. Kumar U., Ajay S. Lightning induced currents in isolated towers // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – 2014. – P. 1684-1690.

45. Silveira F.H., Visacro S., De Conti. Lightning Performance of 138-kV Transmission Lines: The Relevance of Subsequent Strokes // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55 № 6. – P. 1195-1200.

46. Борисов Р.К., Коломец Е.В., Гаффаров Р.Ф. Высокочастотные коммутационные перенапряжения в сети среднего напряжения // *Электричество* – 2020 г. – № 4. – С. 4 -9;

47. Телегин А.В., Базавлук А.А., Денчик Ю.М., Ширковец, А.И. Высокочастотная онлайн-регистрация переходных процессов в сетях 6-110 кВ с оценкой технической состояния коммутационного оборудования // *Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы VI междунар. науч.-практич. конф. Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2017. – С. 167-171.*

48. Florkowski, M., Furgał, J., Pajak, P. Risks of transformers from switching overvoltages in electrical power systems // *Energies* – 2010. – № 86. – P. 245-248.

49. Tastet J., Angays P. Safe Implementation of HV Vacuum Switches in Oil & Gas Installations // *2007 4th European Conference on Electrical and Instrumentation Applications in the Petroleum & Chemical Industry* – 2007. – P. 1-7.

50. Shipp D.D., Dionise T.J., Lorch V., MacFarlane B.G. Transformer Failure Due to Circuit-Breaker-Induced Switching Transients // *IEEE Transactions on Industry Applications* – 2011. – Vol. 47. № 2. – P.707-718.;

51. Chaly A.M., Minaev V. S. Numerical simulation of overvoltage generated at switching on medium-voltage motors with the aid of different circuit breakers // *2012 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)* – 2012 – P. 240-243;

52. Smugala D., Piasecki W., Ostrogorska M., Fulczyk M., Florkowski M., Kłys P. Protecting distribution transformers against Very Fast Transients due to switching operation // *2010 Modern Electric Power Systems* – 2010. – P. 1-6.

53. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2004. – 367 с.

54. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Параметры разряда молнии в задачах грозозащиты // *Известия РАН: Энергетика.* – 2005. – Т. 4. – С. 54-61.

55. Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Ломан В.А., Скрыбина Е.А. Повышение грозоупорности воздушных линий электропередач // Новое в Российской электроэнергетике. – 2017 – № 6. – С. 29-36.

56. Mahmood F., Sabiha N.A., Lehtonen M. Effect of combined AC and lightning-induced overvoltages on the risk of MV insulator flashovers above lossy ground // Electric Power Systems Research. – 2015. – № 127. – P. 101-108.

57. СО 153-34.21.122-2003 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций – Введ. с 30.06.2003. – Москва: ЦПТИ ОРГРЭС. – 2004. 29 с.

58. ГОСТ Р МЭК 62305-4 – 2016 Защита от молнии Ч.1. Общие принципы – Введ. с 30.11.2010 - Москва: Стандартинформ. – 2011. – 50 с.

59. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. – 2-ое издание. – Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнерго РФ. – 1999. – 353 с.

60. Mahmood F., Rizk M.E.M., Lehtonen M., Badran E., Abdel-Rahman M.H. Computation of Peak Lightning-Induced Voltages Due to the Typical First and Subsequent Strokes Considering High Ground Resistivity // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2017. – Vol. 32. № 4. – P. 1861-1871.

61. Kumar U., Pal R., Paramesha K. Evaluation of the Grounding Resistance of Conductors Buried in Steplike Terrain // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – Vol. 51. № 6. – P. 5130-5138.

62. Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Ломан В.А., Скрыбина Е.А., Левченко А.А. Анализ факторов, влияющих на грозоупорность ВЛ // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 3. – С. 52-60.

63. Adamian Y.E., Krivosheev S.I., Korovkin N.V., Monadtysky A.E., Bocharov Y.N., Kolodkin I.S., Kuligin P.I., Titkov V.V. Dependence of Over-Voltage Level of Different Voltage Class Surge Arrestors on Grounding Device Parameters. Experimental Study and Simulation // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference. – Xi'an, China. – 2016. – P. 1888-1892.

64. Анненков В.З. Импульсное сопротивление заземлителей воздушных линий при повторных разрядах молнии // *Электричество*. – 2010. – № 5. – С. 14-18.
65. Alipio R., Visacro S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes // *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. – 2013. – Vol. 55. № 1. – P. 132-139.
66. Alipio R., Visacro S. Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect of Frequency-Dependent Soil Parameters // *IEEE Transactions on power delivery*. – 2014. – Vol. 29. № 2. – P. 716-723.
67. He J., Zhang , Zeng R., Zhao J., Rao H., Cai Z. Influence of impulse breakdown delay of soil on lightning protection characteristics // *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010 – Cagliari, Italy*. – 2010. – P. 1-7.
68. Коровкин Н.В., Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Миневич Т.Г., Шишигин С.Л., Ненашев А.П., Нетреба К.И., Парфентьев А.А. Электромагнитные параметры заземляющих устройств при импульсных воздействиях // *III Российская конференция по молниезащите*. Санкт-Петербург. – 2012. – С. 152-156.
69. Куклин Д.В., Селиванов В.Н. Численный анализ влияния параметров опоры ЛЭП на уровень перенапряжений при прямом ударе молнии // *Труды Кольского научного центра РАН*. – 2014. – № 3 (22). – С. 46-54.
70. Alekseev V.A., Kolodkin I.S., Korovkin N.V., Adamyan Y.E., Krivosheev S.I. The Influence of Ground Parameters on the Maximum Value of Transient Resistance Under Lightning Impact // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering ElConRus*. – 2019. – P. 924-927.
71. Зеличенко А.С., Смирнов Б.И., Шишорина Г.Д. Устройство и ремонт воздушных линий электропередачи и высоковольтных вводов: / Учебник для сред, проф.-техн. училищ. Москва: Высш. шк. – 1985. – 400 с.
72. Гайворонский А.С., Голдобин В.Д. Оценка эффективности зон защиты молниеотводов по результатам численных экспериментов на модели ориентировки лидера молнии // *Энергетик*. – 2019. – № 1 – С. 3-6.



73. Колычев А.В., Боровских А.Н. Регистратор срабатываний нелинейных ограничителей перенапряжений на основе пояса Роговского // Труды Кольского научного центра РАН, No. 2, Jan 2011. pp. 107-111.

74. Гайворонский А.С., Заболотников А.П. Технологии грозозащиты ВЛ высших классов напряжения на основе применения линейных ОПН и разрядников с внешним искровым промежутком // Известия Российской Академии наук. Энергетика, Vol. 3, 2015. pp. 103-117.

75. Зубков А.С. Исследование и разработка мер повышения надежности эксплуатации изоляции сетей средних и высоких классов напряжения, содержащих двухцепные воздушные линии / А.С. Зубков: дис. канд. тех.н наук: 05.14.12. – Новосибирск., 2005.

76. Зубков А.С., Данилов Г.А. Опыт применения подвесных ограничителей перенапряжения в качестве средства повышения надежности работы ВЛ // Энергетик. – 2010. – № 7. – С. 16-20.

77. Mahmood F., Rizk M.E.M., Lehtonen M. Risk-based insulation coordination studies for protection of medium-voltage overhead lines against lightning-induced overvoltages // Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 101. – P. 311-320.

78. Kezunovic M., Dokic T., Said R. Optimal Placement of Line Surge Arresters Based on Predictive Risk Framework Using Spatiotemporally Correlated Big Data // CIGRE. – 2018. – P. 1-9.

79. Christodoulou C.A., Vita V., Maris T.I. On the optimal placement of surge arresters for the efficient protection of medium voltage distribution networks against atmospheric overvoltages // 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – Bucharest, Romania. – 2019. – P. 1-4.

80. СТО 56947007-33.060.40.134-2012 Стандарт организации ОАО "ФСК ЕЭС" Типовые технические решения по системам ВЧ связи – Введ. с 30.10.2012 – ОАО «ФСК ЕЭС». – 2012. – 61 с.

81. Цинкооксидный разрядник. Техническая информация. Публикация SEWG/A 2100R, ABB Switchgear.

82. Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M., Pająk P. Propagation of Lightning, Oscillating and Non-standard Impulse Waveforms in Transformer Windings // Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2020. – P. 1254-1264.

83. Borghetti A., Morched A.S., Napolitano F., Nucci C.A., Paolone M. Lightning-Induced Overvoltages Transferred from Medium-Voltage to Low-Voltage Networks // IEEE Russia Power Tech. – 2005. – P. 1-7.

84. Ndirangu J., Kimemia P., Ndolo R., Nderu J., Irungu G. Appropriate Surge Arrester Lead Lengths for Improved Distribution Transformer Protection – Kenyan Case Study // IEEE PES/IAS PowerAfrica. – 2020. – P. 1-4.

85. Hosseini S.A., Mirzaie M., Barforoshi T. Impact of surge arrester number and placement on reliability and lightning overvoltage level in high voltage substations // Electrical Power and Energy Systems. – 2015. – Vol. 65. – P. 146-158.

86. Невретдинов Ю.М., Власко Д.И. Исследование защиты подстанции 150 кВ от грозовых волн с учетом реальных заземлителей опор ЛЭП на подходах // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – С. 79-88.

87. Takami J., Okabe S., Zaima E. Study of Lightning Surge Overvoltages at Substations Due to Direct Lightning Strokes to Phase Conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25. № 1. – P. 425-433.

88. Адамьян Ю.Э., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Кулигин П.А., Монстырский А.Е., Титков В.В. Влияние характеристик заземляющего устройства на эффективность работы нелинейных ограничителей перенапряжений // Электротехника. – 2018. – № 11. – С. 73-78.

89. Правила устройства электроустановок. Издание 7. – 461 с.

90. Cao W., Wan S., Gu S., Xu H., Chen J., Wang J., Lu L. Development and application of lightning flashover limited equipment for 220 kV AC transmission line // The Journal of Engineering. – 2019. – Vol. 2019. Issue 16. – P. 802-805.

91. Крыжановский В.В., Шур С.С. Резонансостойкий ограничитель перенапряжений. Патент № 2041542 РФ. – № 5063405/07 Заявл. 05.09.1992; Оpubл. 09.08.1995.

92. Бердников Р.Н., Гайворонский А.С., Горюшин Ю.А., Дементьев Ю.А., Тимофеев Д.Г., Шевцов И.В. ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «НЦ ФСК ЕЭС» Устройство грозозащиты высоковольтной воздушной линии, монтируемое на промежуточной опоре, и высоковольтная воздушная линия, снабженная таким устройством. Патент № 2456733 РФ. – № 2011121247/07 Заявл. 26.05.2011; Оpubл. 20.07.2012. Бюл. № 20.

93. Боровицкий В.Г., Лошаков Ю.Е., Власов В.В., Зубков А.С., Сухар В.М., Данилов Г.А. АО «Тюменьэнерго», ЗАО «Феникс-88» Устройство защиты от перенапряжений высоковольтных линий (варианты). Патент № 85040 РФ. – № 2008149550/22 Заявл. 15.12.2008; Оpubл. 20.07.2009. Бюл. № 20.

94. Li Q., Wu M. Simulation Method for the Applications of Ferromagnetic Materials in Suppressing High-Frequency Transients within GIS // IEEE Transactions on Power delivery. – 2007. – Vol. 22. № 3. – P. 1628-1632.

95. Гусейнов Г.А.О., Гусейнов Ч.Г.О., Тилипкин О.Н. ЗАО "МСМ-трейдинг" Изолятор, ограничитель перенапряжений и способ изготовления полимерной оболочки. Патент № 2 203 514 РФ. – Заявл. 24.08.1999; Оpubл. 27.04.2003. Бюл. № 20.

96. Пильщиков В.Е., Гангрский М.Ю., Красавина М.А. ЗАО «Завод энергозащитных устройств» Ограничитель перенапряжения, встроенный в корпус изолятора. Патент № 2259609 РФ. – № 2004112571/09 Заявл. 20.04.2004; Оpubл. 27.08.2005. Бюл. № 24.

97. Smugała D., Piasecki W., Ostrogorska M., Florkowski M., Fulczyk M., Kłys P. Distribution transformers protection against High Frequency Switching Transients // Przegląd Elektrotechniczny – 2012. – № 88 – P. 296-300.

98. Smugała, D. Piasecki, W.; Ostrogórska, M.; Florkowski, M.; Fulczyk, M.; Granhaug, O. New approach to protecting transformers against high frequency transients—wind turbine case study // Przegląd Elektrotechniczny – 2013. – № 89 – P. 186–190.

99. Горюшин Ю.А., Житенев В.В., Золотых А.Г., Ковтун Г.Н. Опыт эксплуатации гирлянд изоляторов-разрядников мультикамерных (ГИРМК) на ВЛ

35, 110 и 220 кВ // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – № 3. – С. 152-159.

100. Podporkin G.V., Enkin E.Y., Kalakutsky E.S., Pilshikov V.E., Sivaev A.D. Overhead Lines Lightning Protection by Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters // IEEE Transactions on Power delivery. – 2011. – Vol. 26. № 1. – P. 214-221.

101. Илюшов Н.Я. Разработка и исследование частотозависимого устройства для подавления высокочастотных перенапряжений / Н.Я. Илюшов: дис. канд. тех. наук: 05.14.12. – Новосибирск., 2014.

102. Гойхенберг Ю.Н., Гамов П.А., Дудоров М.В., Рощин В.Е. Структура аморфизирующегося сплава 5БДСР, используемого для производства // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – Т. 39, № 19 – С. 128-133.

103. Korobeynikov S.M., Ilyushov N.Y. High-current Testing of Frequency Dependent Device // IFOST-2016: Power Engineering and Renewable Energy Technologies. Novosibirsk, Russia. – 2016. – P. 326-328.

104. Протокол технического совета АО "Тюменьэнерго" от 12 декабря 2018 года Секция № 1 Композитные опоры ВЛ 35-110 кВ, Частотозависимый резистор. Сургут. 2018.

105. Лента марки 5БДСР [Электронный ресурс] // Веб-сайт ПАО "Ашинский металлургический завод": [сайт]. URL: <https://www.amet.ru/buyers/product/tape/24/> (дата обращения: 10.март.2022).

106. Илюшов Н.Я., Ломан В.А. Экспериментальная оценка влияния дополнительной намотки на свойства частотнозависимого устройства // Наука. Промышленность. Оборона: труды XVI Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск. – 2015. – С. 496-499.

107. Илюшов Н. Я, Коробейников С. М, Ломан В. А. Патент № 192615 Устройство защиты от высокочастотных перенапряжений, от 19.06.2019 г.

108. Коробейников С.М., Илюшов Н.Я. Низковольтные измерения частотнозависимого резистора // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – Т. 1-1 (25). – С. 192-195.

109. Вагин Д. В, Илюшов Н. Я, Ломан В. А, Персова М. Г, Соловейчик Ю. Г ов Н. Я, Ломан В. А, Персова М. Г, Соловейчик Ю. Г // Программа для моделирования частотнозависимого резистора, № 2019662590 от 17.09.2019 г.

110. Хоз.договор с ОАО "Тюменьэнерго" на разработку и установку опытных образцов устройств защиты силового оборудования "Разработка частотнозависимого резистора для подавления грозových перенапряжений" Договор: 8/12-СИЗП.

111. Korobeynikov S.M., Krivosheev S.I., Magazinov S.G., Loman V.A., Plyushov N.Y. Suppression of Incoming High-Frequency Overvoltage in Transformer Coils // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2021. – Vol. 36. № 5. – P. 2988-2994.

112. Korobeynikov S.M., Loman V.A., Emelyanova. Lightning Overvoltages Suppression for the 35-kV Cable Section Insulation with the Frequency-Dependent Device // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk. – 2021. – P. 212-215.

113. Weaver R.S. The Inductance of a Helix of Any Pitch – Saskatoon, Canada – March 2011. – P. 1-20.

114. Snow C. A simplified precision formula for the inductance of a helix with corrections for the lead-in wires // Bureau of Standards Journal of Research – 1932. – Vol. 9. – P. 419-426.

115. ГОСТ 839-2019 Межгосударственный Стандарт Провода Неизолированные Для Воздушных Линий Электропередачи Технические условия. – Взамен ГОСТ 839-80 – Введ. с 30.10.2019 – Москва: Стандартинформ. – 2019. – 45 с.

116. ГОСТ 31946-2012 Межгосударственный Стандарт Провода Самонесущие Изолированные И Защищенные Для Воздушных Линий Электропередачи Общие технические условия. – Введ. с 03.12.2012 – Москва: Стандартинформ. – 2013. – 23 с.

117. СТО 56947007- 29.060.10.075-2011 Стандарт организации ОАО "ФСК ЕЭС" Типовые технические требования к самонесущим изолированным и

защищенным проводам на напряжение до 35 кВ – Введ. с 04.05.2011 – ОАО «ФСК ЕЭС». – 2011. – 29 с.

118. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. 3-е изд. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение. – 1986. – 488 с.

119. Коробейников С.М., Дрожжин А.П., Сарин Л.И. Скин-эффект в композиционных материалах // Электричество. – 2004. – Т. 7. – С. 2-9.

120. Технические условия ТУ 14-123-149-2009 –Лента быстрозакаленная из магнитомягких аморфных сплавов и магнитомягкого композиционного (нанокристаллического) материала – ОАО "АМЗ". – г. Аша. – 2009. – 17 с.

121. СТО 56947007-33.060.40.125-2012 Общие технические требования к устройствам обработки и присоединения каналов ВЧ связи по ВЛ 35-750 кВ стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС»

122. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т. 1. 9-е изд., перераб. и доп-е изд. – Москва: Машиностроение. – 2006. – 928 с.

123. Rakov V.A., Mareev E.A. Statistical Distributions of Lightning Parameters with Emphasis on their Extremely High Values // Elektrichestvo. – 2021. –№ 3. – Р. 4-25.

124. Гойхенберг Ю.Н., Рошин В.Е., Ильин С.И. Особенности кристаллизации и формирования магнитных свойств аморфных сплавов при нагреве // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Вып. 16, №. 3. – С. 134-142.

125. Грачев А.С. Электрические аппараты: руководство по решению задач проектирования электрических аппаратов. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т. – 2009. – 111 с.

126. ГОСТ ISO 898-1–2014 Механические свойства крепежных изделий из углеродистых и легированных сталей. Часть 1. Болты, винты и шпильки установленных классов прочности с крупным и мелким шагом резьбы – Введ. с 20.10.2014 – Москва: Стандартинформ. – 2018 – 59 с.

127. ГОСТ 4784-2019 Межгосударственный Стандарт Аллюминий И Сплавы Аллюминиевые Деформируемые. Макри – Взамен ГОСТ 4784-97 – Введ. с 27.06.2019 – Москва: Стандартиформ. – 2019 – 35 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 кВ

Расчеты для катушки ЧЗУ с круглым проводом 110 кВ.

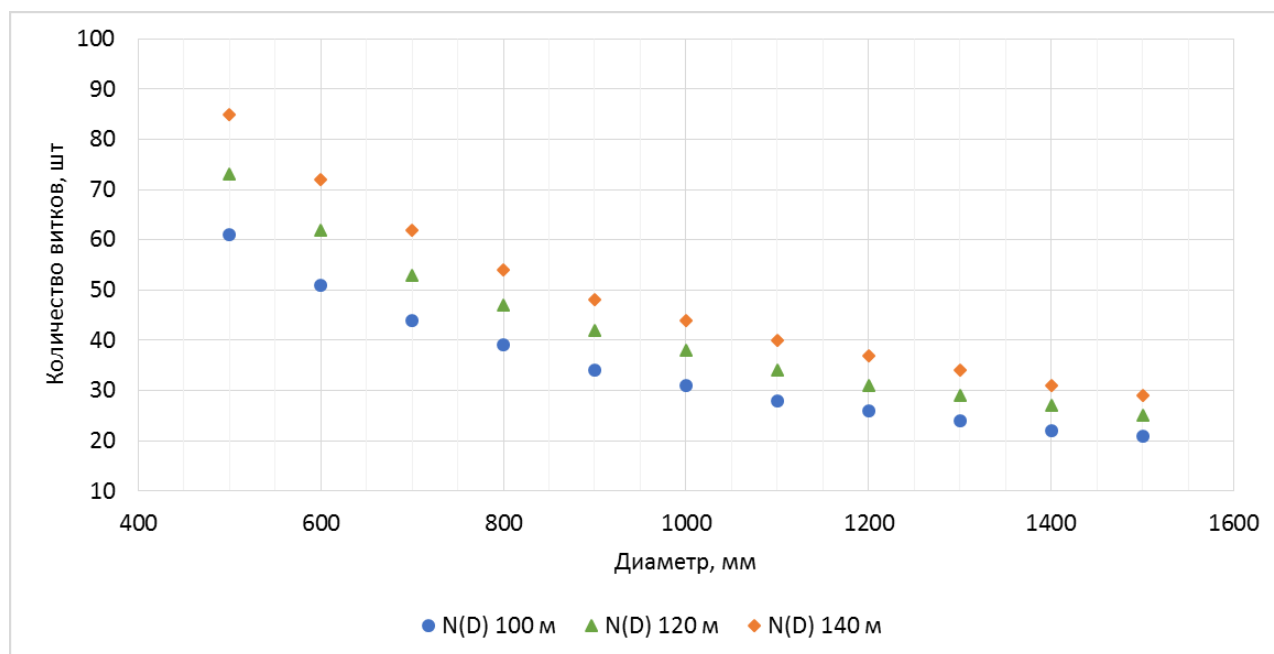


Рисунок А.1 – Зависимость количества витков от диаметра катушки ЧЗУ 110 кВ, при фиксированной длине провода

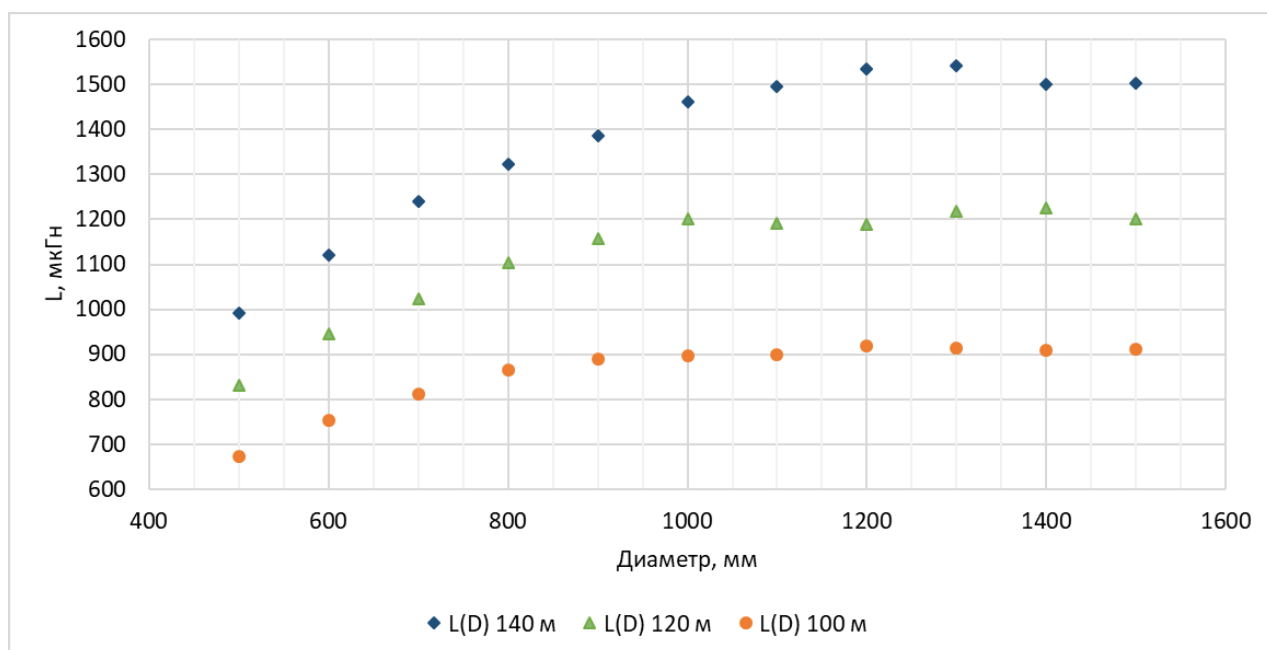


Рисунок А.2 – Зависимость индуктивности от диаметра катушки ЧЗУ 110 кВ, при фиксированной длине провода



Таблица А.1 – Результаты расчетов при длине провода катушки ЧЗУ 110 кВ  
равного 100, 120 и 140 м

D, мм	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500
100 м											
N	21	22	24	26	28	31	34	39	44	51	61
L, мкГн	912	909	914	918	898	897	890	864	811	754	672
120 м											
D, мм	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500
N	25	27	29	31	34	38	42	47	53	62	73
L, мкГн	1202	1225	1217	1188	1192	1200	1158	1103	1024	946	832
140 м											
D, мм	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500
N	29	31	34	37	40	44	48	54	62	72	85
L, мкГн	1504	1500	1542	1534	1495	1462	1385	1322	1240	1121	992

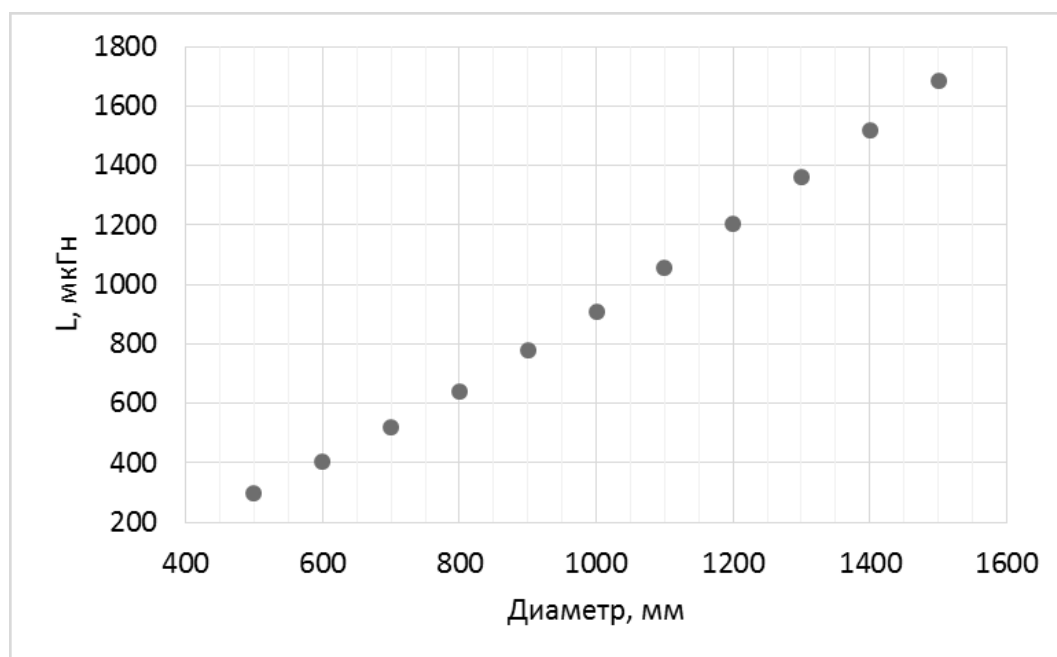


Рисунок А.3 – Зависимость индуктивности катушки ЧЗУ 110 кВ от диаметра при  
постоянном количестве витков

Таблица А.2 – Результаты расчетов катушек при постоянном количестве витков разного диаметра

D, см	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500
l <sub>кат</sub> , м	146	136	127	119	109	99	88	78	68	58	49
L, мкГн	1685	1519	1359	1204	1054	910	778	641	518	404	299

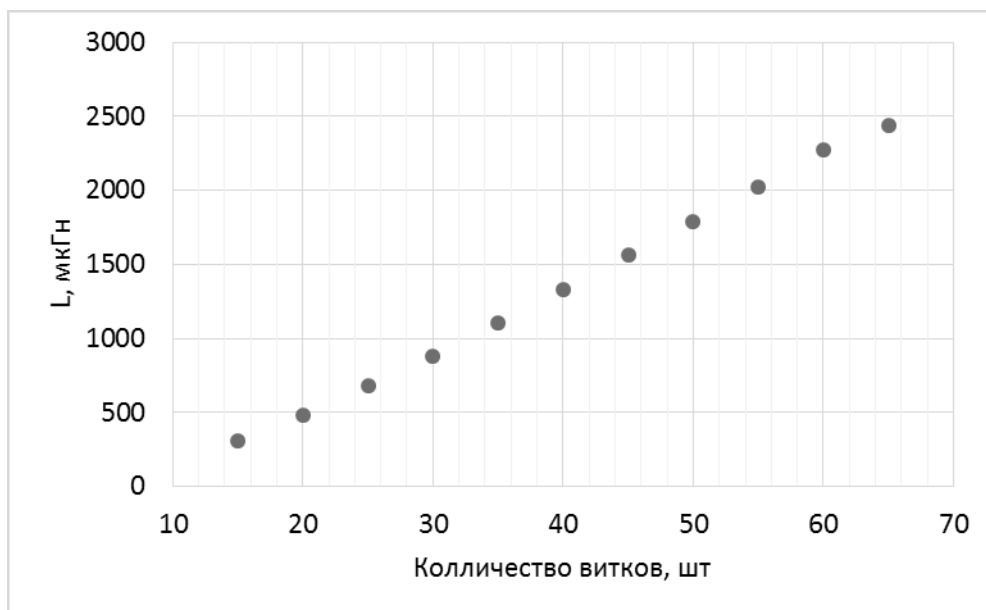


Рисунок А.4 – Зависимость индуктивности катушки ЧЗУ 110 кВ от количества витков при постоянном диаметре катушки (1000 мм)

Таблица А.5 – – Результаты расчетов катушек при постоянном диаметре (1000 мм) при разном количестве витков

N	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15
l <sub>кат</sub> , м	208	192	176	160	144	128	112	94	80	64	48
L, мкГн	2440	2274	2024	1793	1561	1332	1102	880	677	484	309

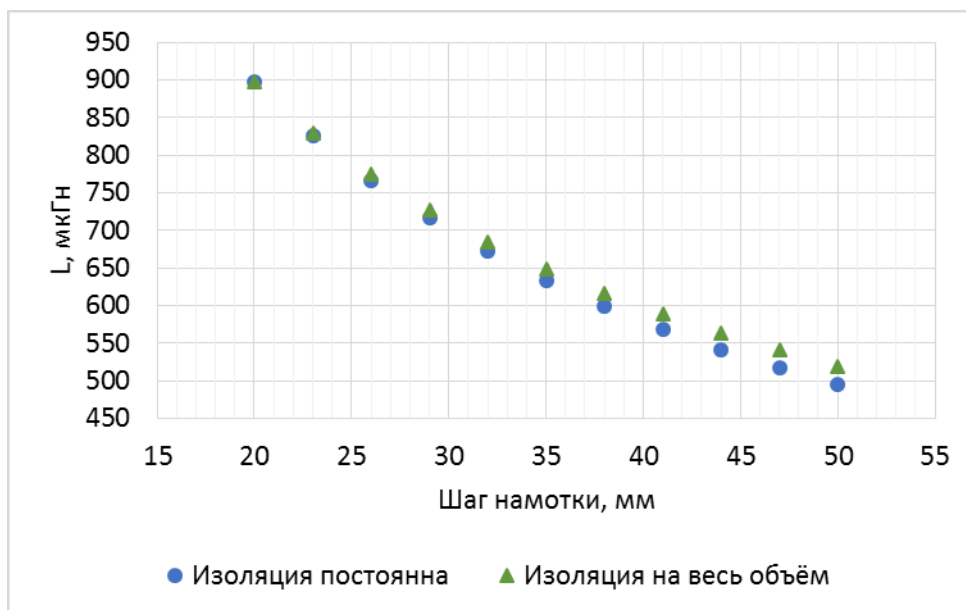


Рисунок А. 5 – Зависимость индуктивности катушки от шага намотки

Таблица А.6 – Результаты расчетов катушек при изменении шага намотки

р, мм	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50
Толщина изоляции постоянна											
L, мкГн	897	826	767	716	672	633	599	568	542	517	495
Изоляция выполнена по всему объему устройства											
L, мкГн	897	830	774	727	685	649	617	589	563	541	520

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

## АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы Ломана Валентина  
Алексеевича на тему «Исследование и совершенствование способа  
подавления высокочастотных перенапряжений с помощью  
частотнозависимого устройства»

Город Новосибирск

11.04.2022

На предприятии создана комиссия в следующем составе:

Председатель:

- Первый заместитель директора филиала Нижневартовские электрические сети – главный инженер – Бут В.В.

Члены комиссии:

- Заместитель главного инженера по эксплуатации – Иванков Е.А.

- Заместитель начальника Службы изоляции и защиты от перенапряжений – Смирнов Г.А.

Рассмотрены результаты внедрения выводов и рекомендаций диссертации Ломана В.А., предоставленной на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Комиссия пришла к следующему выводу: полученные в работе данные по расчёту оптимальных габаритов ЧЗУ позволят разработать и изготовить защитные устройства с лучшими технико-экономическими характеристиками для применения в проекте реконструкции и модернизации подстанции ПС 220/110/35/6 кВ Факел филиала Нижневартовские электрические сети. Экономический эффект на одну фазу, оснащённую ЧЗУ изготовленным с учётом рекомендаций, будет рассчитан после года эксплуатации за счёт снижения числа грозových перенапряжений, воздействующих на оборудование и повышения длительности срока эксплуатации трансформаторного оборудования.

Председатель комиссии:

Член комиссии:

Член комиссии:



# ПРИЛОЖЕНИЕ В ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

245

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



### ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 192615

### УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ОТ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НОВОСИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"  
(RU)**

Авторы: **Коробейников Сергей Миронович (RU), Илюшов  
Николай Яковлевич (RU), Ломан Валентин Алексеевич (RU)**

Заявка № 2019119289

Приоритет полезной модели 19 июня 2019 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 24 сентября 2019 г.

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 19 июня 2029 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ившин



# ПРИЛОЖЕНИЕ Г СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019662590

**Программа для моделирования частотнозависимого  
резистора**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (RU)**

Авторы: **Соловейчик Юрий Григорьевич (RU), Персова Марина  
Геннадьевна (RU), Вагин Денис Владимирович (RU), Илюшов  
Николай Яковлевич (RU), Ломан Валентин Алексеевич (RU)**

Заявка № 2019661460

Дата поступления 17 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 сентября 2019 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев