

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи

ИЛЮШОВ НИКОЛАЙ ЯКОВЛЕВИЧ

Разработка и исследование частотозависимого устройства для подавления  
высокочастотных перенапряжений

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

Диссертация

На соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
**Коробейников Сергей Миронович**

Новосибирск – 2014

## Оглавление

Введение.....	4
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ ПО</b>	
<b>ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМ В СЕТЯХ 110 кВ</b>	
1.1 Основные виды грозových перенапряжений.....	10
1.2 Анализ аварийности трансформаторов в условиях Крайнего Севера.....	19
1.3 Анализ способов подавления перенапряжений.....	28
1.4 Попытки разработки частотозависимого устройства.....	36
1.5 Выводы по главе 1 и постановка задач исследования. ....	41
<b>ГЛАВА 2. НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ</b>	
2.1 Оценка влияния скин-эффекта на сопротивление материалов.....	42
2.2 Скин-эффект в многослойной структуре.....	48
2.3 Выводы по главе 3.....	55
<b>ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>	
3.1 Математическая постановка формулировки задачи программы.....	56
3.2. Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами низковольтных измерений.....	61
3.3 Определение зависимости сопротивления образца от его геометрических размеров при компьютерном моделировании.....	62
3.4 Определение характеристик 28-лучевого частотозависимого устройства.....	64
3.5 Компьютерное моделирование частотозависимого устройства в виде четырёхугольной катушки и спирали.....	69
3.6 Выводы по главе 3.....	78
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ЧАСТОТОЗАВИСИМОГО</b>	
<b>УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИИ ОАО «ТЮМЕНЬЭНЕРГО»</b>	
4.1 Расчёт геометрических размеров частотозависимого устройства.....	80

4.2	Расчет электродинамической стойкости частотозависимого устройства.....	88
4.3.	Расчет термической устойчивости.....	90
4.4	Расчёт экономического эффекта частотозависимого устройства.....	91
4.5	Исследование эффективности применения частотозависимого устройства для снижения высокочастотной составляющей грозových перенапряжений.....	93
4.6	Численный анализ эффективности применения частотозависимого устройства при его установке на подстанциях напряжением 110 кВ.....	108
4.7	Выводы по главе 4.....	123
<b>ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ЧАСТОТОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ</b>		
5.1	Измерение полного сопротивления опытных образцов частотозависимого устройства.....	125
5.2	Испытания опытных образцов частотозависимого устройства импульсным напряжением.....	131
5.3	Определение характеристик опытных образцов частотозависимого устройства при проведении сильноточных измерений.....	134
5.4	Определение магнитной проницаемости ленты 5БДСР.....	146
5.5	Выводы по главе 5.....	150
	Заключение.....	151
	Библиографический список использованной литературы.....	153
	Приложение А.....	163
	Приложение Б.....	186

## Введение

Высокочастотные перенапряжения, воздействующие на изоляцию оборудования подстанций, являются следствием ударов молнии в линию либо коммутации выключателей и разъединителей. Частотный диапазон грозовых перенапряжений составляет 200-300 кГц, при коммутациях разъединителями – около и выше 1 МГц. При этом высокочастотные перенапряжения наиболее опасны для устройств имеющих индуктивный характер, в первую очередь для трансформаторов. Основной причиной выхода из строя изоляции объектов электроэнергетики до настоящего времени является поражение молнией [1-9].

Следует отметить, что с ограничением амплитуды (уровня) грозовых перенапряжений успешно справляются современные защитные аппараты – нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и при правильном выборе на стадии проектирования их параметров и взаимного расположения с защищаемым оборудованием проблем по обеспечению надежной эксплуатации оборудования, как правило, не возникает. Вместе с тем, ОПН не могут повлиять на крутизну фронта воздействующих грозовых перенапряжений, они ограничивают лишь амплитуду перенапряжений [10-14].

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). Также следует отметить, что эффективность ограничения высокочастотных перенапряжений с помощью ОПН снижается из-за наличия индуктивности собственно защитного аппарата и его присоединений [15-21].

В качестве одной из мер, позволяющих повысить эффективность работы ОПН, а также снизить опасность возникновения грозовых перенапряжений, можно рассматривать применение частотозависимого устройства, включаемого

последовательно в расщелку между проводом воздушных линий (ВЛ) и ошиновкой подстанции (ПС).

### **Цель работы**

Повышение эффективности защиты изоляции электрооборудования подстанций от высокочастотной составляющей грозовых перенапряжений.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести теоретические и экспериментальные исследования по выбору эффективных электрических и конструктивных параметров частотозависимого устройства;

- провести математическое и физическое моделирование реальных конструкций отдельных модулей частотозависимого устройства;

- проанализировать эффективность снижения высокочастотной составляющей грозовых перенапряжений при варьировании сопротивления и индуктивности частотозависимого устройства для различных типов подстанций напряжением 110 кВ;

- разработать конструкцию частотозависимого устройства;

- разработать и испытать устройства подавления грозовых перенапряжений для Ноябрьских сетей ОАО «Тюменьэнерго»;

- провести высоковольтные испытания опытного образца и его частей.

### **Объект исследования.**

Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений.

### **Предмет исследования**

Частотная зависимость параметров активно-реактивных элементов.

### **Методы исследования**

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

Теоретический метод включает: анализ существующих методов подавления высокочастотных перенапряжений в сетях 110 кВ; оценка влияния скин-эффекта на различные материалы; математическое моделирование для определения

оптимальных размеров и формы частотозависимого устройства; оценка эффективности действия частотозависимого устройства по защите оборудования подстанции от грозových перенапряжений.

Экспериментальный метод включает: измерение частотных зависимостей образцов частотозависимого устройства, разработку конструкции частотозависимого устройства; определение электрических параметров опытных образцов частотозависимого устройства; проведение высокоточных измерений, разработку технических требований на частотозависимое устройство.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечивается сочетанием теоретических исследований с проведением экспериментов, при этом результаты теоретических расчётов согласуются с экспериментальными данными.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- предложен новый метод защиты оборудования подстанций за счет увеличения как активного, так и реактивного сопротивлений защитного устройства с ростом частоты;

- выявлено, что реактивное сопротивление частотозависимого устройства (ЧЗУ) всегда оказывается выше, чем активное сопротивление.

- экспериментально показано, что частотная зависимость сопротивления ЧЗУ сохраняется с ростом тока вплоть до килоамперного диапазона.

**Практическая ценность и реализация результатов работы**

- разработана конструкция частотозависимого устройства на основе скин-эффекта для подавления грозových перенапряжений в сетях 110 кВ;

- проведен анализ эффективности использования частотозависимого устройства для защиты оборудования подстанции;

Результаты работы позволяют повысить надежность защиты оборудования подстанций в сетях 110 кВ за счёт:

- уменьшения амплитуды входного импульса перенапряжения, что уменьшает опасность для основной изоляции оборудования;

- увеличения длины его фронта, что снижает опасность пробоя продольной изоляции оборудования.

Разработанные, изготовленные и испытанные опытные образцы частотозависимого устройства установлены на подстанции Сугмутская ОАО «Тюменьэнерго», филиал Ноябрьские электрические сети.

### **Личный вклад**

Постановка цели работы и задач исследования выполнены совместно с научным руководителем С.М. Коробейниковым. Научные результаты, представленные в диссертации, получены автором. Низковольтные и сильноточные измерения образцов частотозависимого устройства проведены автором совместно с А. Мелеховым и С.В. Шевченко. Компьютерное моделирование оптимальной формы ЧЗУ проводилось автором по пакету прикладных программ, созданных Д.В. Вагиным и Ю.Г. Соловейчиком. Эффективность применения ЧЗУ для подавления перенапряжений оценена автором совместно Ю.А. Лавровым. Сборка опытных образцов ЧЗУ проводилась совместно со студентами.

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

1. Теоретическое обоснование возможности подавления грозовых перенапряжений с помощью устройства, работающего по принципу скин-эффекта.
2. Результаты компьютерного моделирования оптимальной конструкции частотозависимого устройства.
3. Конструкция частотозависимого устройства.
4. Оценка эффективности опытного образца ЧЗУ для подавления грозовых перенапряжений в сетях 110 кВ.

### **Апробация работы**

Диссертационная работа и её основные положения докладывались и обсуждались на первой Российской конференции по молниезащите, г. Новосибирск 2007, XI Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск: НГТУ. 2010, на 8 научно-практическом семинаре Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок по проблемам оценки

технического состояния и проверки эффективности средств защиты от грозových и высокочастотных коммутационных перенапряжений генерируемых элегазовыми выключателями и разъединителями, Тюмень, 2013, на XVI Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» г. Николаев 2013 год, на международном научном конгрессе «Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения», Сиббезопасность–СпасСиб–2013, Новосибирск.

### **Публикации**

По результатам работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Получен патент РФ на полезную модель №132633 «Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений»

Работа выполнялась в рамках научно-исследовательской работы по договору № 8/12-СИЗП от 28.08.2012 г. «Разработка частотозависимого устройства для подавления высокочастотных перенапряжений» (Руководитель Коробейников С.М., ответственный исполнитель Илюшов Н.Я.)

### **Объём и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных работ из 95 наименований и приложения. Работа изложена на 162 страницах основного текста, иллюстрируется 96 рисунками и 32 таблицами.

### **Краткое содержание работы**

В первой главе проводится литературный обзор по вопросам, которые будут рассмотрены в последующих главах и постановка задач исследования. Проведен анализ существующих методов подавления высокочастотных перенапряжений, выявлен наиболее перспективный и обозначен путь его совершенствования.

Во второй главе приведены результаты низковольтных измерений по исследованию действия скин-эффекта в некоторых материалах и намечены способы увеличения сопротивления материалов при изменении частоты входного сигнала.

В третьей. главе проведено компьютерное моделирование оптимальной формы конструкции ЧЗУ. Проанализированы зависимости сопротивления конструкции от частоты при изменении её формы и размеров. Выбрана оптимальная форма для разработки опытного образца частотозависимого устройства.

В четвёртой главе рассчитана конструкция опытного образца ЧЗУ, приведены расчёты её электродинамической и термической стойкости, а также стоимостные показатели. Проведен анализ эффективности применения ЧЗУ для защиты оборудования подстанций в сетях 110 кВ.

В пятой главе приведены результаты измерений сопротивления ЧЗУ на различных частотах методом амперметра-вольтметра и результаты измерения сопротивления образца при сильноточных испытаниях. Описаны результаты испытаний ЧЗУ на электрическую прочность, проведенные в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СИБНИИЭ.

В заключении резюмируются основные выводы по результатам работы.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ ПО ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМ В СЕТЯХ 110 КВ

### 1.1 Основные виды грозовых перенапряжений

Благодаря своей протяженности воздушные линии электропередач наиболее подвержены ударом молнии. Возникающие при этом импульсы грозового перенапряжения, распространяясь по линиям от точки удара в обе стороны линии, представляют реальную опасность для электрооборудования близкорасположенных подстанций. Защита подстанций от грозовых перенапряжений в первую очередь реализуется устройством грозозащитных тросов. Они натягиваются над линией и присоединяются к каждой из опор, причем связь должна быть металлической. Однако наличие тросов не приводит к полной безопасности воздушных линий от поражения ударами молнии. В соответствии с [22, 23], основными расчётными случаями прямых ударов молнии в присоединенные к подстанциям ВЛ являются:

- удары молнии в фазные провода (например, точка 1 на рисунке 1.1);
- удары молнии в опоры (например, точка 2 на рисунке 1.1);
- удары молнии в трос (например, точка 3 на рисунке 1.1).

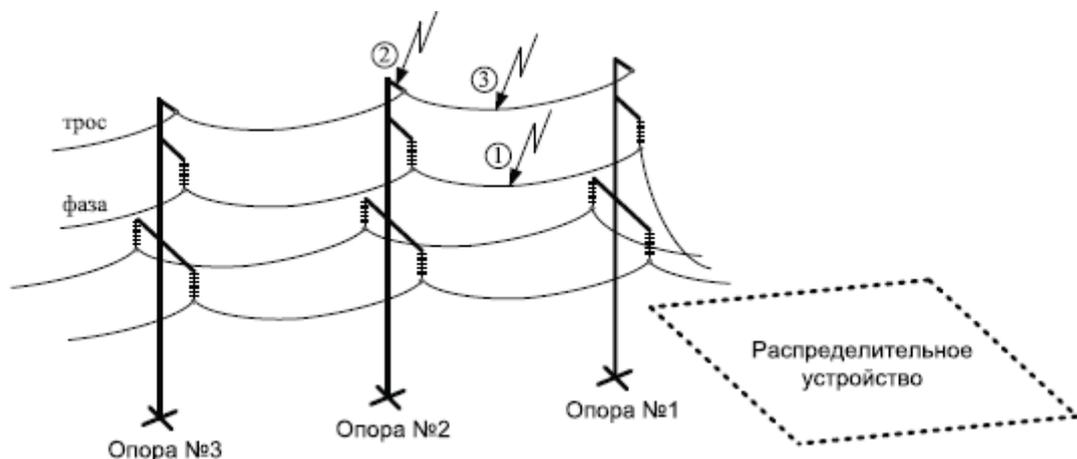


Рисунок 1.1 - Возможные места ударов молнии в воздушную линию [22]

Возникающие при грозовых разрядах импульсные напряжения имеют максимальную длительность в несколько десятков микросекунд и аналитически аппроксимируются разностью двух экспонент:

$$u = U_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий спад напряжения на хвосте волны;

$\beta$  – коэффициент, характеризующий подъём напряжения на фронте волны.

Типовая форма грозового импульса показана на рисунке 1.2. [23]

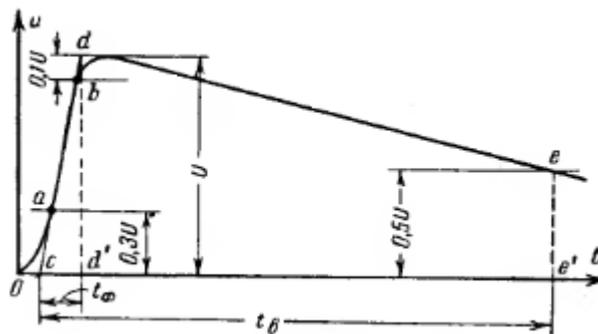


Рисунок 1.2 - Стилизованная форма грозовой импульсной волны

Длительность фронта волны равна времени возрастания амплитуды импульса от  $0,3U$  до  $0,9U$ , а длительность самой волны определяется временем снижения амплитуды хвоста волны до значения  $0,5U$ . Еще во времена СССР для унификации разрядных характеристик изоляции была стандартизована испытательная волна с фронтом длиной  $1,5$  мкс и хвостом длиной  $40$  мкс, обозначаемая как волна  $1,5/40$  [24].

При воздействии подобного импульса перенапряжения на воздушные промежутки и при его достаточной амплитуде возникает искровой разряд, проходящий ряд промежуточных стадий в своем развитии. Для возникновения самостоятельного разряда необходимо появление в воздушном промежутке начального электрона, создающего начальную лавину. Это время называется холостым временем запаздывания  $t_{хол}$  и зависит от наличия внешнего ионизатора. За время формирования разряда  $t_{раб}$ , то есть за время, протекшее от появления начального электрона до начала искрового разряда, происходит развитие лавин, стримера и лидерного разряда. Таким образом, время разряда  $t_p$  является

промежутком времени от начала приложения волны до образования искрового разряда в воздушном промежутке.

Волны грозового происхождения, набегающие с ВЛ на ПС, имеют различную крутизну и различный энергетический потенциал, характеризующийся амплитудой волны  $U_B$  и ее длительностью  $\tau_B$ . Вид и параметры грозовых волн, воздействующих на изоляцию оборудования подстанции, являются случайными, так как определяются такими случайными факторами как амплитуда ( $I_M$ ) и крутизны ( $A_M$ ) тока молнии, удаленность грозового поражения провода ВЛ от ПС, вид поражения ВЛ (удар молнии в опору или грозотрос, прорыв молнии сквозь тросовую защиту на провод). Случайными величинами можно также считать импульсную прочность линейной изоляции воздушной линии  $U_{BCX}(t)$ , значения сопротивления заземления опоры ( $R_3$ ) и конструкции опоры [25].

Условно грозовые волны перенапряжения 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 (рисунок 1.3,а);

- *срезанные волны*, образованные в результате прорыва молнии сквозь тросовую защиту с последующим перекрытием линейной изоляции ВЛ (рисунок 1.3,б);

- *короткие волны*, образованные при обратных перекрытиях с тела опоры на провод при ударах молнии в опору или грозотрос (рисунок 1.3,в).

Тип и энергетический потенциал грозовой волны определяется пересечением исходной волны напряжения, формирующейся на проводе в месте прорыва молнии сквозь тросовую защиту:

$$U_B(t) = i_M(t) \frac{Z_{к.пр}}{2} = \frac{Z_{к.пр}}{2} \cdot \frac{I_M}{\eta} \left[ \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{t_2}\right) \right] \quad (1.12)$$

с вольт-секундной характеристикой (BCX) линейной изоляции ВЛ

$$U_{BCX}(t) = U_{10}^{(-)} \sqrt{1 + \frac{b}{t}} \quad (1.13)$$

где  $i_M(t)$  и  $I_M$  – соответственно, волна тока молнии и амплитуда тока молнии;

$t_1 = (\tau_B - \tau_\Phi) / (-\ln(0.5))$ ,  $t_2 = \tau_\Phi / 5$ ,  $\eta = \exp(-\tau_\Phi / 5)$  - параметры волны;

$\tau_B$  и  $\tau_\Phi$  - соответственно, длина волны и фронта воздействующего тока молнии;  
МОЛНИИ;

$Z_{к.пр}$  – волновое сопротивление провода с учетом импульсной короны;

$U_{10}^{(-)}$  - разрядное напряжение линейной изоляции при воздействии волны отрицательной полярности, примерно равное 50%-ному разрядному напряжению (700 кВ для ВЛ 110 кВ);

$b$  – параметр ВСХ линейной изоляции (2,5 для ВЛ 110 кВ);  $t$  - время, мкс.

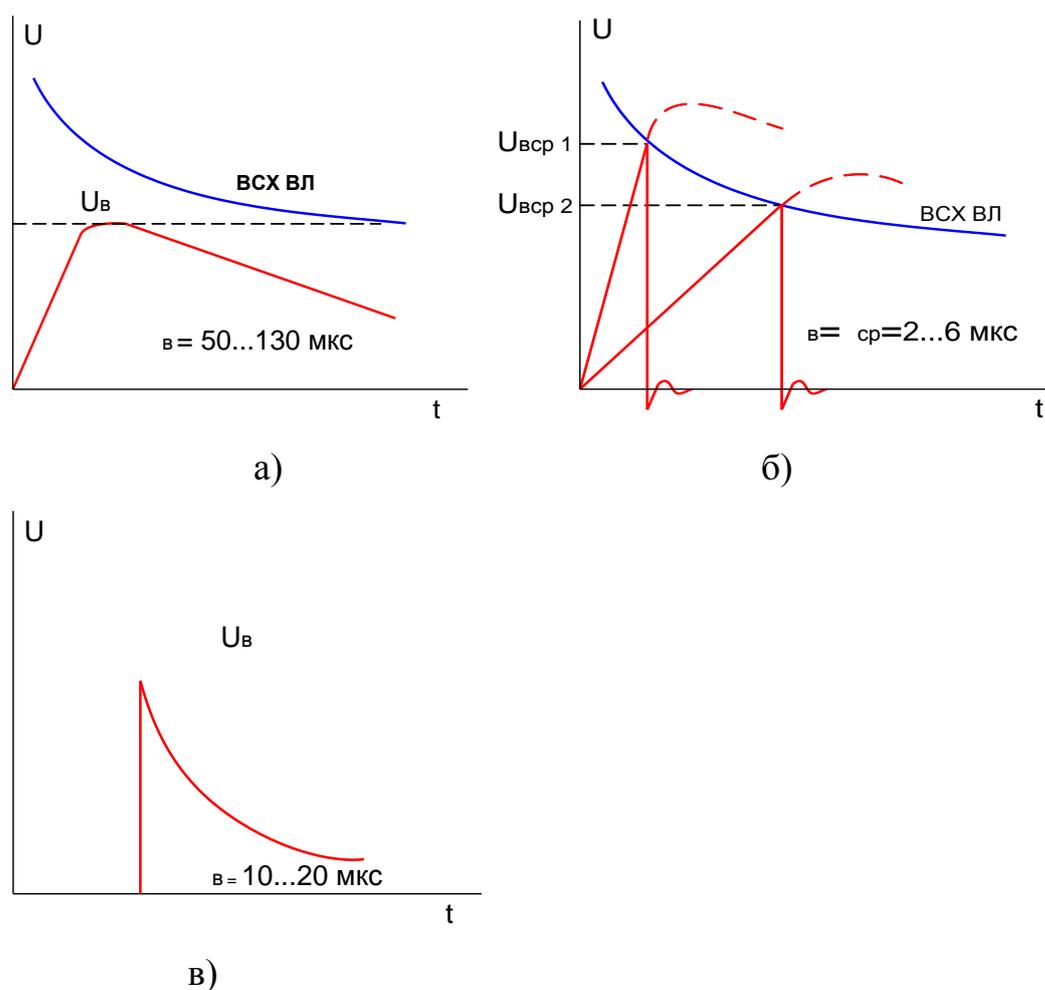


Рисунок 1.3 - Стилизованные кривые форм грозowych волн, набегающих на ПС при ударе молнии в провод (а, б) и опору или грозотрос (в)

Полные волны близки по форме волны тока молнии и возникают при прямых ударах в провода линии. Распространяясь по линии, полная волна деформируется и затухает за счёт импульсной короны, возникающей под действием высокого напряжения бегущей волны, а также за счёт активного сопротивления провода и земли. Образование импульсной короны ведет к увеличению ёмкости провода относительно земли, в результате чего заряд на проводе растёт в квадратичной зависимости от напряжения, а не пропорционально ему. При этом скорость распространения волны на линии замедляется в соответствии с [26]:

$$v_k = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0(u)}} \quad (1.14)$$

где  $L_0$  и  $C_0$  – индуктивность и ёмкость воздушной линии.

Так как  $C_0$  зависит от напряжения, то с возрастанием амплитуды импульса, его скорость замедляется тем больше, чем выше значение  $u$ . Происходит отставание вершины импульса и это увеличивает длительность всего фронта импульса. Расчёты показывают, что при начальном коронном напряжении 220 кВ после пробега расстояния 1,5 км длительность фронта импульса увеличивается на 0,5 мкс.

Так как грозовая волна распространяется между проводом и землей, на форму импульса оказывают влияние и активные сопротивления провода и земли. Потерями в проводе по сравнению с потерями в земле можно пренебречь. Так как фронт грозовой волны эквивалентен току высокой частоты, то в земле проявляется поверхностный эффект и её сопротивление возрастает. Под влиянием сопротивления земли длительность фронта волны возрастает в соответствии с формулой, приведённой в [26]:

$$\tau_\phi = \frac{\rho l^2}{260h^2 z^2} \quad (1.15)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта,  $\text{ом} \cdot \text{м}$ ;

$l$  – расстояние, пройденное импульсом перенапряжения,  $\text{м}$ ;

$h$  – средняя высота подвеса провода над землей, м;

$z$  – волновое сопротивление линии, Ом;

Так, например, при прямом ударе молнии в незащищенные участки воздушных линий, то есть на расстоянии 2 км от подстанции при средней высоте подвеса провода в 10 м, большом сопротивлении грунта 1000 Ом·м и при волновом сопротивлении линии в 500 Ом, длительность фронта импульса перенапряжения увеличится на 0,6 мкс.

Кроме этого за счёт активных потерь при возврате тока волны по земле происходит и снижение её амплитуды, которое можно рассчитать по формуле[26]:

$$U = U_{max} e^{-\gamma\sqrt{x}} \quad (1.16)$$

где  $U_{max}$  – амплитуда импульса напряжения в месте прямого удара молнии;

$x$  – расстояние от места удара молнии до расчётной точки;

$\gamma$  – коэффициент, равный 0,07 для линий 110 кВ.

Приведённые расчёты показывают, что полная волна грозового импульса, возникающая при прямом ударе молнии в провода на расстоянии более 1,5-2 км уже не опасна для изоляции оборудования подстанции. Опасность представляют только полные волны, образующиеся при прорыве через грозозащитные тросы в непосредственной близости от подстанции, то есть в защищенном подходе, протяженность которого обычно составляет 2 км.

Вероятность прорыва молнии на провода через грозозащитные тросы можно оценить по следующей формуле [26]:

$$\lg P_{np} = \frac{\delta\sqrt{h_{оп}}}{90} - 4 \quad (1.17)$$

где  $h_{оп}$  - высота опоры;  $\delta$  – защитный угол троса.

В соответствии с расчётными данными, приведенными в [25], вероятность прорыва молнии на провода через грозозащитные тросы для линий 110 кВ на металлических опорах равна 0,0019. При этом удельное число отключений линии в год при ударе молнии в провод составляет 0,06 на 100 км и 100 грозовых часов.

Гораздо большую опасность для оборудования подстанции представляют срезанные волны, вероятность образования которых определяется как:

$$P_{cp} = P[u_B(t) \geq u_{BCX}(t)] \quad (1.18)$$

То есть срезанные импульсы грозового перенапряжения образуются в том случае, если амплитуда напряжения при определенном токе молнии превышает импульсное разрядное напряжение изоляции линии. Максимальное напряжение срезанного импульса определяется вольт-секундной характеристикой изоляции линии. Согласно [27], средний ток молнии равен 30 кА, а нижняя граница реальных значений амплитуд токов молнии по закону распределения составляет  $I_m = 5 \dots 7$  кА. При волновом сопротивлении коронирующего провода ВЛ  $Z_{к.пр} = 350-420$  Ом даже минимальные амплитуды волн напряжения, образовавшихся при прорыве молнии на провода ВЛ, составляют 1000-1500 кВ, что превышает импульсную прочность изоляции ВЛ 110 кВ. Поэтому, в соответствии с расчётными данными, приведенными в [24], даже при малой вероятности прорыва молнии на провода через грозозащитные тросы, равной 0,0019 для линий 110 кВ, срезанные волны возникают примерно в 90% случаев. При этом вероятность перекрытия изоляции равна 0,77.

Импульсы с еще более крутым, практически вертикальным фронтом, образуются при ударе молнии в опору или грозозащитный трос с последующим обратным перекрытием изоляции ВЛ. Вероятность удара молнии в опору или в трос вблизи опоры рассчитывается по формуле:

$$P_{on} = \frac{4h_0}{l_{np}} \quad (1.19)$$

Длительность таких импульсов составляет всего 10-20 мкс. Вероятность обратного перекрытия при ударе молнии в опору или трос составляет 0,13 и 0,04 соответственно, но именно короткие импульсы вызывают среднее удельное отключение линии в год 1,73 и 0,89 [25].

Опасность срезанных и коротких импульсов обусловлена тем, что за счёт высокой крутизны своего фронта данные импульсы создают на оборудовании подстанции высокочастотные перенапряжения, превышающие напряжение изоляции [28-31]. Так, например, в обмотке трансформатора под действием импульсного напряжения развивается переходный процесс, приводящий к

перенапряжениям на продольной изоляции между соседними элементами обмотки (витками, катушками, слоями) и на главной изоляции, то есть на изоляции обмотки относительно заземленных частей трансформатора. Обмотку трансформатора можно представить в виде цепочной схемы, состоящей из последовательно включенных элементов, например, витков. Каждый такой элемент, помимо индуктивности  $\Delta L$ , имеет ёмкость относительно земли  $\Delta C$  и ёмкость  $\Delta K$  между соседними элементами. Электрическая схема замещения обмотки трансформатора представлена на рисунке 1.4. При напряжениях промышленной частоты сопротивление ёмкостей  $\Delta C$  и  $\Delta K$  велики и можно пренебречь токами протекающими через эти ёмкости по сравнению с токами, протекающими по виткам катушки. При воздействии импульсов грозового перенапряжения, имеющих среднюю частоту 300 кГц, токи через ёмкости обмотки становятся соизмеримыми с токами через её индуктивности. Обусловлено это высокой скоростью изменения напряжения во фронте импульса и чем выше крутизна фронта импульса, тем больше ёмкостной ток.

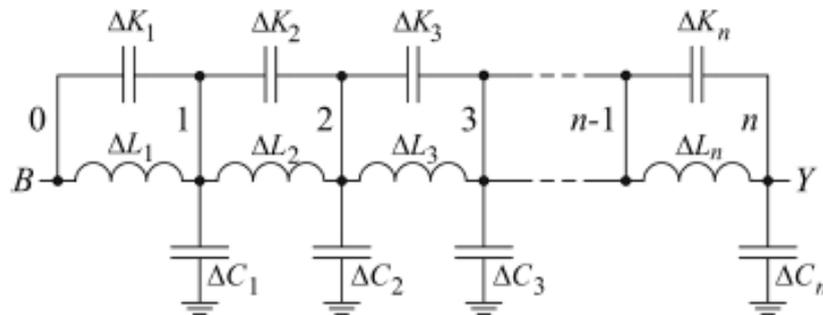


Рисунок 1.4 - Схема замещения обмотки трансформатора

В момент появления грозового импульса с крутым фронтом и амплитудой  $U_0$  начинается период распределения напряжения вдоль обмотки по ёмкостям схемы, при этом токами через индуктивность можно пренебречь. Начальное распределение напряжения можно описать выражением, приведенным в [26].

$$U_n(x) = U_0 \cdot e^{-\alpha l \left(\frac{x}{l}\right)} \quad (1.20)$$

где  $x$  – расстояние от ввода обмотки до точки, в которой определяется напряжение;

$l$  - длина обмотки;

$$\alpha l = l \sqrt{\frac{C_0}{K_0}} = \sqrt{\frac{C}{K}} - \text{коэффициент, характеризующий крутизну спада}$$

кривой ёмкостного распределения, и принимаемый для силовых трансформаторов больше 5;

$\alpha$  – коэффициент распространения, равный:

$$\alpha = \sqrt{Z_0 Y_0}$$

где  $Z_0$ ,  $Y_0$  – продольное сопротивление и поперечная проводимость линии на единицу длины.

Как следует из выражения (1.20), начальное напряжение убывает по обмотке неравномерно [28]. В результате крайне неравномерным оказывается и распределение напряжения по виткам катушки. Это создаёт большие перенапряжения на продольной изоляции начальной части обмотки. Физически неравномерность распределения напряжения объясняется тем, что импульс зарядного тока через продольные ёмкости  $\Delta K$  по мере удаления от начала обмотки уменьшается из-за ответвления тока в поперечные ёмкости  $\Delta C$ . В результате ёмкости  $\Delta K$  первых витков обмотки заряжаются в значительной большей степени, чем последующие. Поэтому продольная изоляция начальной части обмотки воспринимает большую часть приложенного напряжения.

Следовательно, для изоляции оборудования подстанции опасность исходит не только от значения напряжения импульса перенапряжения, но и от крутизны его фронта. Чем больше значение крутизны фронта, тем на меньшее количество витков распределится напряжение входного импульса и тем вероятнее пробой межвитковой изоляции. Следовательно, эффективная защита оборудования должна не только резко снижать амплитуду напряжения, но и увеличивать длительность фронта входного импульса перенапряжения.

## 1.2 Анализ аварийности трансформаторов в условиях Крайнего Севера

В соответствие с данными, приведенными в отчете [32] основной причиной инцидентов на трансформаторном оборудовании серий ТДТН и ТРДН класса напряжения 110 кВ и мощностью от 16 до 40000кВА, находящимся в эксплуатации ОАО «Тюменьэнерго» в период с 2002 по 2012 г.г., является образование межвитковых коротких замыканий – 80% инцидентов. В 12% от общего числа инцидентов с трансформаторным оборудованием причиной выхода из строя являются механические повреждения обмоток. И только 8% инцидентов происходили по причинам несвязанных с проблемами обмоток, а именно: срабатывание газовой и дифференциальной защит трансформатора. Результаты анализа отображены на диаграмме, приведенной на рисунке 1.5. Как следует из диаграммы более 90 % дефектного состояния трансформаторного оборудования указанной номинальной мощности и класса напряжения, приходится на повреждения обмоток.

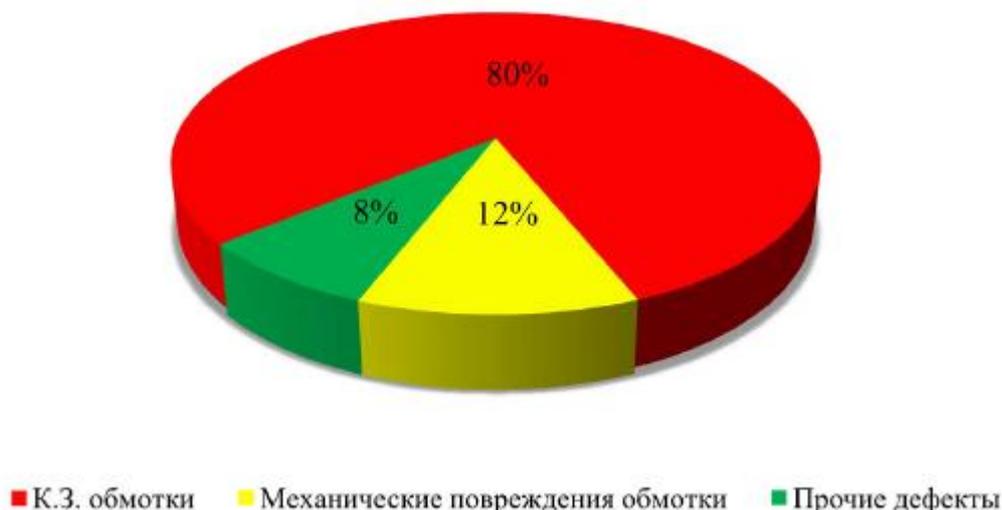


Рисунок 1.5 - Диаграмма распределения дефектов в процентном отношении для трансформаторного оборудования 110 кВ номинальной мощности 16 – 40 000 кВА ОАО «Тюменьэнерго»

В силовых трансформаторах типа ТМ и ТМА при общем числе трансформаторов имеющих повреждение 401, межвитковые замыкания имели место в 74 случаях, составив 18% от всех инцидентов.

В процентном соотношении результат анализа для трансформаторного оборудования серий ТМ и ТМА, напряжения 10/0,4кВ выглядит следующим образом:

1. Дефекты обмотки составляют 43 % от общего числа инцидентов.
2. Среди дефектов обмотки преобладают механические повреждения – 25 % случаев; межвитковые замыкания в одной или в обеих обмотках являются причиной инцидентов в 18 % от общего количества дефектов обмотки.
3. Причины для вывода оборудования в ремонт, не связанные с дефектным состоянием обмотки - течь масла, проблемы с анцапфным переключателем, отгорание контактных соединений, разрушение вводов, выгорание шпильки – составляют 57 %.

Статистические данные о количестве и месторасположении оборудования выведенного в ремонт, а также о разновидности и числе соответствующих дефектов приведены в таблице 1.1 и проиллюстрированы на диаграмме, приведенной на рисунке 1.6.

**Таблица 1.1 - Статистика выхода из строя и основные виды дефектов силовых трансформаторов напряжения 10/0,4кВ по филиалу ОАО «Тюменьэнерго» Тюменских распределительных сетей за период 2008-2012 г.г.**

Наименование филиала	Общее количество трансформаторов	Количество трансформаторов с механическими дефектами	Количество трансформаторов с межвитковыми КЗ	Число трансформаторов с прочими дефектами
Тюменское ТПО	200	46	22	132
Ишимское ТПО	134	30	10	94
Тобольское ТПО	36	13	23	0
Южное ТПО	31	11	19	1
Сумарное количество	401	100	74	227



Рисунок 1.6 - Диаграмма распределения дефектов в процентном отношении для трансформаторного оборудования напряжения 10/0,4кВ по филиалу ОАО «Тюменьэнерго» Тюменских распределительных сетей за период 2008-2012 г.г.

Подчеркнем, что Тюменские распределительные сети находятся на юге ХМАО, вне зоны вечной мерзлоты. Подобная ситуация характерна не только для ОАО «Тюменьэнерго». По данным ОАО «Самараэнерго» для трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110-500 кВ около 30% от общего количества замыканий сопровождалось возникновением внутренних коротких замыканий [33, 34]. В целом, согласно данным Департамента генеральной инспекции по эксплуатации электрических станций и сетей, для трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110-500 кВ мощностью 63МВА и более, около 30% от общего числа технологических нарушений сопровождалось возникновением внутренних коротких замыканий [35-42]. Можно сказать, что в районах Крайнего Севера, доля межвитковых замыканий в статистике выхода из строя трансформаторов значительно выше, чем в зоне более теплого климата.

Низкая грозоупорность линий, связанная с высоким удельным сопротивлением грунта подтверждается данными ЗАО «ФЕНИКС-88» [43]. По этой причине при грозовых перенапряжениях имеют место отключения ВЛ, вызванные обратными перекрытиями изоляции линий из-за высокого сопротивления в цепи стекания тока молнии в землю. При этом зачастую отключаются сразу две цепи двухцепных ВЛ. Число таких отключений, как правило, ежегодно превышает 50 % общего числа грозовых отключений

(таблица 1.2, сведения за 2007 г.) и сопровождается в большинстве случаев успешным автоматическим повторным включением (УАПВ) линии.

Таблица 1.2 - Число отключений ВЛ в районах Крайнего Севера

Регион	Филиал и электрические сети	Протяжённость ВЛ, км	Общее число отключений	Число отключений на двухцепных ВЛ (%)	Удельное число отключений на 100 км
Ханты-Мансийский автономный округ	Когалымские	1564	36	32(89)	2,3
	Нижневартовские	2934	25	49(80)	3,2
	Энергокомплекс	1956	17	10(59)	0,86
	Нефтеюганские	2535	17	10(59)	0,67
	Уральские	1856	26	14(54)	1,4
Ямало-Ненецкий автономный округ	Ноябрьские	1648	56	33(59)	2,11
	Северные	1470	17	4(24)	1,2
Тюменская область	Тюменские	1281	2	-(-)	0,2
	Тобольские	1319	6	-(-)	0,45
	Ишимские	1863	4	-(-)	0,2
	Южные	1010	4	-(-)	0,4
Всего		22368	271	172(63)	1,2

В целом можно сделать вывод, что отключения оборудования подстанций, в первую очередь связано с внутренними короткими замыканиями, возникающими при межвитковых замыканиях, пробоях изоляции обмоток и отводов, а также при недостаточной электродинамической стойкости обмоток при КЗ. Основной причиной, вызывающей повреждения главной и межвитковой изоляции в условиях Крайнего Севера являются грозовые перенапряжения [44,45].

Особенностью северных районов является повышенное сопротивление грунтов в условиях вечной мерзлоты. По данным [46] г. Ноябрьск входит в зону распространения вечномерзлых грунтов с максимальной мощностью до 25 м (рисунок 1.7). На этом рисунке также представлены изолинии глубин сезонного промерзания (см). Схема распространения вечной мерзлоты построена на основании "Схематическая мерзлотная карта СССР". Copyright © atlas-yakutia.ru Россия 2007 - 2014

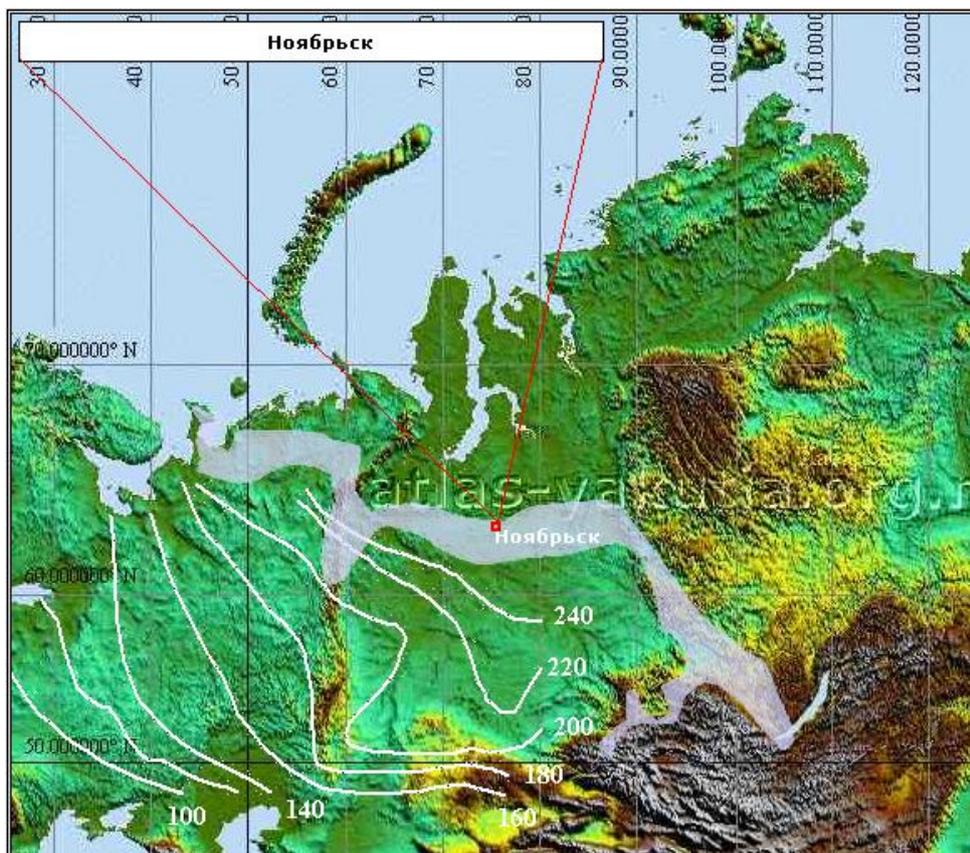


Рисунок 1.7 - Распространение вечномёрзлых грунтов и глубин промерзания на широте г. Новосибирск

В соответствии с [47] геолого-литологическое строение грунта в данной местности до разведанной глубины 7,0 м в основном состоит из современных техногенных отложений (tIV), представленных насыпным грунтом – песком мелким, флювиогляциальных среднечетвертичных отложений (fII), представленные песками пылеватыми, мелкими и средней крупности средней плотности, а также суглинка. Средняя годовая температура почвы составляет -6...-9<sup>0</sup>С. Средняя месячная температура почвы на глубинах 5 и 10 см в г. Новосибирск в тёплый период показана на рисунке 1.8.

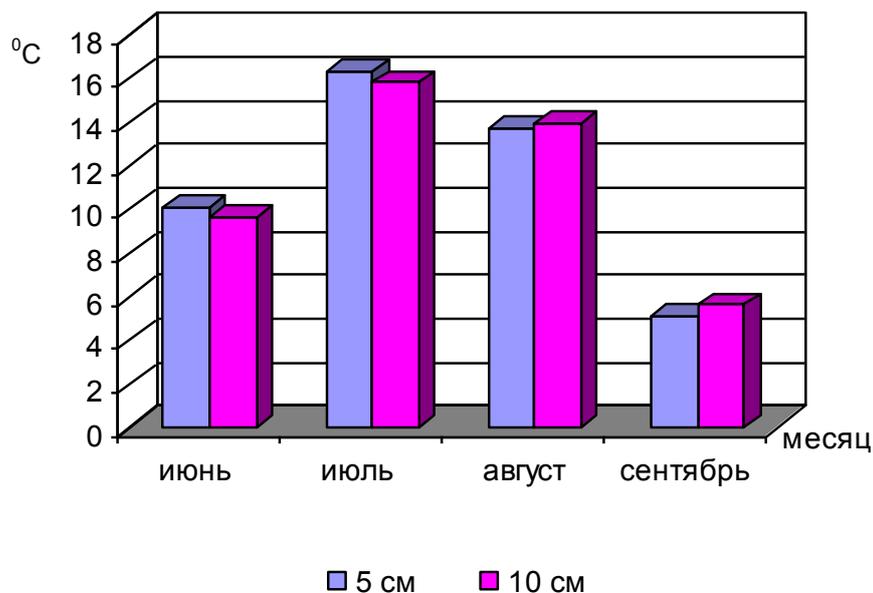


Рисунок 1.8 - Средняя месячная температура  $^{\circ}\text{C}$  почвы на различных глубинах (по коленчатым термометрам) г. Ноябрьск

Средняя месячная температура почвы в течении года представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Средняя месячная температура почвы,  $^{\circ}\text{C}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	11	12
-26	-25	-20	-9	0	12	18	14	6	-5	-19	-25

Зависимость удельного сопротивления грунта (песок и суглинок) от его температуры по данным [48] представлена на рисунке 1.9.

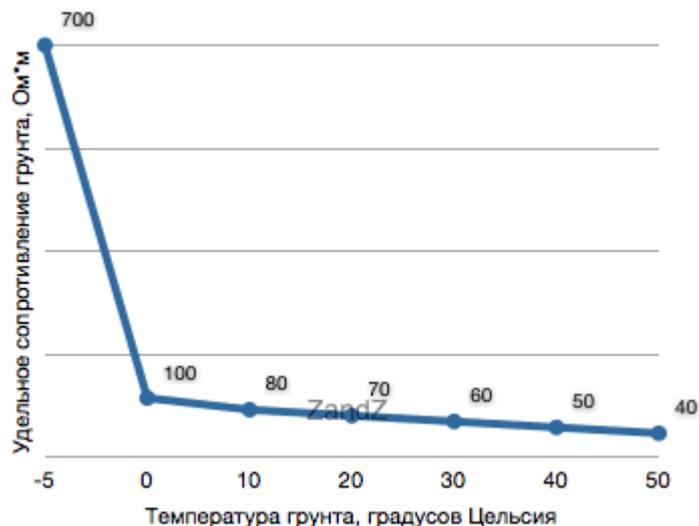


Рисунок 1.9 - Зависимость удельного сопротивления грунта (песок и суглинок) от его температуры

На этом графике хорошо видно, что при температуре ниже нуля грунт резко повышает свое удельное сопротивление. Вода переходит из жидкого в твёрдое агрегатное состояние и в грунте почти прекращаются процессы переноса заряда ионами солей и кислотными/щелочными остатками. Поэтому удельное сопротивление вечномёрзлых грунтов у поверхности летом составляет 500 - 1000 Ом·м, а при нулевых температурах может достигать 20 000 Ом·м.

В соответствие с требованиями ПУЭ (ст. 4.2.142) [49] наибольшее допустимое сопротивление заземляющего устройства опор для воздушных линий номинальным сопротивлением 110 кВ при эквивалентном удельном сопротивлении более 500 Ом·м должно быть менее 20 Ом. Максимальное сопротивление заземления опор при этом не должно превышать 30 Ом.

Заземлитель молниеотвода характеризуется сопротивлением, которое окружающая земля оказывает стекающему с заземлителя току. Сопротивление заземлителя зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления грунта. Для расчёта сопротивления заземлителей молниеотводов различной формы используются формулы, приведенные в [50]:

сопротивление одиночного стержневого вертикального молниеотвода

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \frac{4l(2l+1)}{d(4t+t)} \right] \quad (1.21)$$

сопротивление горизонтальной полосы

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{1,5l}{\sqrt{bt}} \quad (1.22)$$

сопротивление железобетонного фундамента

$$R = 1,7 \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{4l}{b} \quad (1.23)$$

где  $l$ - длина трубы или полосы;  $t$ - глубина залегания полосы, верхнего конца вертикального электрода;  $b$  - ширина полосы;  $d$  – диаметр трубы или стержня.

Расчётное значение  $\rho$  определяется по данным измерений удельного сопротивления грунта и равно:

$$\rho = k\rho_{\text{изм}}$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий влажность грунта и равный 1,4 при средней влажности грунта, и 2,6 при повышенной влажности.

Обычно при устройстве заземлителя молниеотвода используют вертикальные стержни длиной 2,5-3 м, либо горизонтальные полосы длиной 5 м, заглубленные в грунт на 0,5-0,7 м. Примерные значения сопротивления заземления, получаемые в различных грунтах с помощью одиночных электродов, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Сопротивление одиночных заземляющих электродов в разных грунтах

Грунт	Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Сопротивление стержня длиной 2,5-3 м, Ом	Сопротивление полосы длиной 5 м, Ом
Суглинок	200	60	50
Супесок	500	150	125
Песок	1000	300	250

Необходимо так же учитывать, что при прохождении через заземляющие электроды больших импульсных токов, образующихся при прямом ударе молнии в опору, у поверхности земли создаются высокие напряженности поля  $E = J\rho$ , превосходящие пробивные напряженности грунта. При этом вокруг электродов образуются зоны искрения, и сопротивление заземления уменьшается. Но при этом короткий фронт импульса грозового разряда создаёт падение напряжения на индуктивности протяженного заземлителя, что ограничивает отвод тока в землю. Соответственно сопротивление заземлителя увеличивается. В любом случае сопротивление заземлителя при прохождении тока молнии отличается от стационарного сопротивления заземлителя и в расчётах необходимо учитывать импульсный коэффициент  $\alpha_{и}$ . В общем виде  $\alpha_{и} = R_{и}/R$ , где  $R_{и}$  импульсное сопротивление заземлителя, а  $R$  – стационарное. Значения импульсных коэффициентов для различных удельных сопротивлений грунта, приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Значения импульсных коэффициентов  $\alpha_n$ 

Заземлитель	Значения $\alpha_n$ при удельном сопротивлении $\rho$ , Ом·м			
	100	200	500	1000
Вертикальные стержни, соединенные полосой (расстояние между стержнями вдвое больше их длины): 2-4 стержня 8 стержней 15 стержней	0,5	0,45	0,3	
	0,7	0,55	0,4	0,3
	0,8	0,7	0,55	0,4
Две горизонтальные полосы длиной по 5 м, расходящиеся в противоположные стороны от точки присоединения токоотвода	0,65	0,55	0,45	0,4
Три полосы длиной по 5 м, симметрично расходящиеся от точки присоединения токоотвода	0,7	0,6	0,5	0,45

Рассчитывая сопротивление заземления опор воздушных линий по формулам, приведенным выше с учётом и без учёта импульсных коэффициентов, получаем значения на много превышающие максимальные в соответствии с требованиями ПУЭ. Именно повышенное значение сопротивления заземления опор становится основной причиной обратного перекрытия с опоры на фазный провод при прямом ударе молнии в вершину металлической опоры воздушной линии или в грозозащитный трос. В результате обратного перекрытия образуются короткие волны, имеющие большую крутизну фронта импульса и высокую амплитуду. Таким образом, необходимым условием надёжной защиты подстанций является устройство хорошего заземления молниеотвода, что очень сложно выполнить в условиях Крайнего Севера.

### 1.3 Анализ способов подавления перенапряжений

Меры и средства защиты от перенапряжений подразделяются на организационные и технические. Организационные меры защиты, в свою очередь, включают системные и оптимизационные, технические меры подразделяются на превентивные и коммутационные [51].

Системные и оптимизационные меры не являются специальными мерами защиты от перенапряжений. За счёт сооружения параллельных линий,

резервирования оборудования и реализации в условиях эксплуатации оптимальной стратегии работы сети, они существенно могут уменьшить вероятность развития системной аварии.

Превентивные меры защиты оказывают постоянное влияние на сеть. Их назначение – предотвратить возникновение перенапряжений или способствовать ограничению их величины. Благоприятное действие превентивных мер защиты проявляется на протяжении всего переходного процесса. К таким мерам можно отнести, в частности, применение выключателей, работа которых не вызывает появления больших перенапряжений (например, выключателей без опасных повторных зажиганий дуги между контактами и с шунтирующими сопротивлениями), грозозащитных тросов, заземление опор на линиях, емкостную защиту изоляции обмоток трансформаторов, заземление нейтрали трансформаторов через дугогасящие реакторы.

*Коммутационные* средства защиты от перенапряжений, как правило, содержат в себе коммутирующие элементы, например, искровые промежутки. К коммутационным средствам защиты можно отнести также и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) [52]. В этих аппаратах отсутствуют искровые промежутки и высоконелинейные резисторы подключены к сети постоянно. Однако при повышении напряжения на ОПН сверх наибольшего рабочего, резко уменьшается их сопротивление, что эквивалентно срабатыванию искровых промежутков [53].

Меры защиты от перенапряжений могут быть направлены на уменьшение последствий перекрытия или пробоя изоляции. Однако, главное значение имеют мероприятия предусматривающие снижение уровня перенапряжений и, тем самым, вероятность пробоя или перекрытия изоляции. В ряде случаев, эти меры снижают вынужденную составляющую перенапряжений на изоляции. К ним можно отнести применение шунтирующих реакторов, синхронных компенсаторов и батарей продольной компенсации, секционирование длинных линий, применение регуляторов сильного действия. Снижение вынужденной составляющей напряжения при коммутационных перенапряжениях

обеспечивается также глухим заземлением нейтрали в сетях 110 кВ и выше, установкой пониженных коэффициентов трансформации трансформаторов перед оперативными коммутациями линий, ограничением минимальной мощности питающей системы, а также программированием оптимальной очередности действия релейной защиты при аварийных включениях и отключениях линий.

В то же время, ряд мер и средств защиты предназначены для ограничения переходной составляющей коммутационных перенапряжений. К ним относятся меры, обеспечивающие более благоприятные начальные условия коммутаций (например, снижение начального заряда при включении в цикле АПВ на линиях с установленными измерительными трансформаторами напряжения или выключателями с шунтирующими сопротивлениями), коммутации линии выключателями при оптимальной фазе э. д. с. Заземление нейтрали через дугогасящий реактор снижает вероятность возникновения дуговых перенапряжений. Демпферные обмотки в генераторах предотвращают возможность появления опасных перенапряжений на высших гармониках при несимметричных к. з. на линиях.

Для защиты оборудования от прямых ударов молнии применяются молниеотводы на подстанциях и грозозащитные тросы на линиях. Уменьшение вероятности опасных грозовых перенапряжений при ударах молнии в молниеотводы и другие заземленные элементы линий и подстанций достигается соединением их с землей при обеспечении достаточно малого импульсного сопротивления заземления. Защита изоляции от волн, набегающих по линиям, осуществляется с помощью разрядников и нелинейных ограничителей перенапряжений [54].

Наиболее простым устройством для защиты от перенапряжения являются искровые промежутки (ИП). Они срабатывают, когда перенапряжение в точке их установки превысит некоторую критическую величину. Это приводит к изменению схемы или параметров сети. Перенапряжение на изоляции ограничивается до допустимых пределов, а вероятность возникновения перенапряжений высокой кратности существенно уменьшается.

ИП обладают значительными недостатками, ограничивающими их применение. Во-первых, их пробивное напряжение имеет большой статистический разброс, что затрудняет координацию пробивных напряжений ИП с характеристиками защищаемой изоляции. Во-вторых, из-за резкой неоднородности электрического поля между контактами существенно повышается разрядное напряжение ИП при крутых фронтах волн перенапряжений. В-третьих, любые срабатывания ИП вызывают образование дуги тока короткого замыкания, которое в сетях 110 кВ и выше самостоятельно погаснуть не может. В-четвёртых, срабатывание ИП вызывает резкий срез напряжения на защищаемой изоляции, что приводит к возникновению опасных градиентных перенапряжений на продольной изоляции обмоток трансформаторов, реакторов и электрических машин.

Улучшить работу ИП можно принудительным гашением дуги при помещении его в трубку из газогенерирующего материала. В этом случае при протекании тока молнии через ИП разгорается мощная дуга, создающая высокое давление и газовыделение. Газы, выходя через трубку, создают продольное дутьё и дуга гаснет.

Длительное время основным средством защиты от перенапряжений считался вентильный разрядник, состоящий из искровых промежутков и последовательных нелинейных сопротивлений. При воздействии на вентильный разрядник перенапряжений происходит пробой ИП и нелинейные сопротивления присоединяются к цепи. При этом перенапряжение в месте установки аппарата определяется падением напряжения на нелинейных сопротивлениях.

Наибольшим недостатком вентильных разрядников является недостаточная нелинейность материала рабочего сопротивления. И это не позволяет обеспечить достаточное ограничение перенапряжений. К тому же использование искровых промежутков требует уменьшения сопровождающего тока до величин надёжно отключаемой промежутками и получения более пологой вольт-секундной характеристики разрядника.

Для более значительного улучшения характеристик разрядников необходимо отказаться от применения искровых промежутков и использовать резисторы с большей нелинейностью вольт-амперной характеристикой и большей пропускной способностью. Такими свойствами обладают варисторы, изготовленные из полупроводникового материала на основе окиси цинка. Данные ограничители напряжения (ОПН) устанавливаются в основном в сетях 110 кВ и выше [55,56], а также для сетей с изолированной и резонансно заземленной нейтралью [57,58].

Однако, ОПН также имеют ряд существенных недостатков. Отсутствие искровых промежутков обуславливает протекание через ОПН токов рабочего напряжения сети частотой 50 Гц. При большой величине этих токов может произойти перегрев варистора и выход ОПН из строя. К тому же ток, протекающий через ограничитель в нормальном режиме, содержит ёмкостную и активную составляющие. При напряжениях до  $0,7U_{100}$ , преобладает ёмкостная составляющая тока. При больших напряжениях резко возрастает нелинейная проводимость и активная составляющая тока, что так же приводит к значительному нагреву варистора. Критическое значение градиента рабочего напряжения 1,0 кВ/см соответствует максимально допустимому току через варистор в 1 мА.

Третьим недостатком ОПН является то, что его пропускная способность зависит от амплитуды и длительности тока через варистор. Поэтому значительный нагрев имеет место и при протекании через ОПН токов импульсов коммутационных перенапряжений, имеющих большую длительность. Токи 80-120А способны проплавить в варисторах диаметром 28 мм сквозные отверстия. Большой прочностью ОПН обладают при воздействии грозовых импульсов перенапряжения, имеющих меньшую длительность. Так при коротких импульсах 8/20 мкс, варисторы не разрушаются при прохождении токов 1000-1500А [54].

Существенным недостатком ОПН является и зависимость конструкции от класса напряжений и характеристик сети. Наибольшие сложности возникают при разработке ОПН для распределительных сетей, имеющих большую протяженность. Обусловлено это тем, что в распределительных сетях

наблюдается большое число замыканий на землю и значительная величина тока замыкания. Это приводит к тому, что для безаварийной эксплуатации ОПН необходим точный выбор его параметров. Основными факторами, являющимися необходимыми при выборе ОПН являются [59,61]:

- максимально допустимое напряжение с учетом длительности его воздействия;
- расчетный импульсный ток;
- расчетный коммутационный ток.

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

Следует отметить, что ОПН не могут повлиять на крутизну фронта воздействующих грозовых перенапряжений, они ограничивают лишь амплитуду перенапряжений, зависящей от остающегося напряжения на защитном аппарате. 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). Также следует отметить не эффективность ограничения ВЧ-перенапряжений с помощью ОПН, обусловленной 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 [61]. Все это сужает область применения ОПН для защиты оборудования подстанций.

Эффективным средством ограничения ВЧ перенапряжений так же является установка на питающих шинах, на длинных воздушных переходах к силовым трансформаторам специальных емкостей типа конденсаторов связи. Конденсатор должен обеспечивать передачу сигналов ВЧ связи в диапазоне 16 - 1000 кГц при максимальной пиковой мощности огибающей ВЧ сигнала не менее 400 Вт.

Предпочтительное место установки специальных емкостей, а также емкостных ТН - средняя часть шин [61]. Но данный способ ограничения перенапряжений имеет свои существенные недостатки, к которым относятся:

- высокая стоимость конденсаторов и их технического обслуживания;
- диэлектрические потери конденсатора при выборе большой ёмкости
- уменьшение надёжности за счёт старения конденсаторов.

Для распределительных устройств с протяженными сборными шинами эффективной мерой ограничения ВЧ перенапряжений является высокочастотное деление шин продольными реакторами, в качестве которых могут быть использованы высокочастотные заградители без элементов настройки с упрощенной защитой [61]. Высокочастотные свойства заградителя характеризуются полосой заграждения, полосой частот, в которой сопротивление заградителя должно быть не меньше допустимого значения. В полосе заграждения активная составляющая полного сопротивления ВЧЗ должна быть не менее чем в 1,41 раза больше характеристического сопротивления линии, для которой этот ВЧЗ предназначен. Напряжение волны перенапряжения, возникающей на воздушной линии, распределяется между реактором, конденсаторами элемента настройки и входным сопротивлением шин ПС. Поэтому для защиты конденсаторов настройки и силовой катушки параллельно силовой катушке должен подсоединяться элемент защиты (разрядник или ОПН), ограничивающий напряжение на элементах заградителя до безопасного для них значения. При этом для выбора заградителя должны учитываться номинальный рабочий ток, ток короткого замыкания, напряжение ВЛ, габариты ВЛ и требуемая полоса заграждения. [59].

Анализ способов подавления перенапряжений показывает, что все устройства, применяемые для защиты оборудования подстанций, имеют свои существенные недостатки. Все это вызывает необходимость поиска новых, более простых и надёжных способов защиты.

Один из таких способов был предложен в работах [62-67], где для подавления высокочастотных перенапряжений предполагается использовать скин-эффект.

Резистор, рост высокочастотного сопротивления которого обеспечивает скин-эффект, и сопротивление которого значительно увеличивается при частотах, характерных для перенапряжений, должен включаться последовательно с защищаемым объектом. При этом на низкой частоте он не будет препятствовать прохождению тока, а на высокой частоте будет служить поглощающим фильтром. Высокочастотное перенапряжение падает, в основном, на резисторе и высокочастотная составляющая не проходит в защищаемый прибор или подстанцию, если он установлен на подходе к подстанции.

Принцип действия частотозависимого устройства рассмотрен в статье [62]. Традиционный скин-эффект, рассматриваемый в металлах, приводит к слабой зависимости сопротивления от частоты. Это происходит за счет некоторого уменьшения сечения проводника, по которому фактически протекает ток. Как известно, переменный ток неоднородно распределен по сечению проводника. Глубина токового слоя в проводнике определяется магнитной проницаемостью  $\mu$ , частотой  $\omega$ , проводимостью  $\sigma$ :

$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \sigma \omega}} \quad (1.24)$$

Можно показать, что максимальная частотная зависимость достигается в случае, когда толщина скин-слоя много меньше поперечных размеров проводника. В пределе она должна соответствовать зависимости  $\sqrt{\omega}$ . Основываясь на этой зависимости, отношение сопротивления на частоте 50 кГц к сопротивлению на частоте 50 Гц не может превышать 30 для любых однородных материалов.

В дисперсном материале, составленном из композиции проводящего и непроводящего ферромагнитных порошковых материалов, выталкивание тока в тонкую приповерхностную область должно привести к новому эффекту. Дело в том, что в композиционном материале, при изменении концентрации проводящей компоненты, ток изменяется немонотонно. При низком значении концентрации электропроводность мала, а при некотором значении, называемом порогом проводимости, происходит ее резкий рост на несколько порядков. При

трехмерном протекании пороговая концентрация значительно ниже, чем при двухмерном протекании. Выбирая фактическую концентрацию таким образом, чтобы она была выше "объемного" порога протекания, но ниже "поверхностного" порога протекания, можно получить дополнительное увеличение эффекта частотной зависимости номинала резистора.

Расчеты частотной зависимости для двухкомпонентной модели смеси, проводящей и непроводящей фаз в кубической решетке, основываются на следующем. Электропроводность зависит от концентрации  $p$ , отношения  $H/a$  толщины  $H$  к размеру частиц  $a$ , удельной проводимости  $\sigma_1$  электропроводной компоненты, порогов протекания в трехмерном случае  $p_{c,3}$  и в двумерном случае  $p_{c,2}$  [68].

$$\sigma_{\text{эфф}} = \sigma_1 \cdot (H/a)^{(t_2 - t_3)/v_3} (p - p_{c,3} - (p_{c,2} - p_{c,3})(H/a)^{-1/v_3})^{t_2} \quad (1.25)$$

где  $t_2, t_3, v_3$  - критические индексы проводимости,  $t_2 \approx 1.3$ ,  $t_3 = 1.6 \div 2$ ,  $v_3 \approx 0.9$ .

Значение  $H$  не совпадает с толщиной скин-слоя. На самом деле уменьшение эффективной электропроводности приводит к изменению размера скин-слоя

$$H = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \sigma_{\text{эфф}} \cdot \omega}} \quad (1.26)$$

и для нахождения как того, так и другого параметров необходимо решить систему уравнений (1.25) и (1.26). Проще всего это сделать графическим методом. На Рисунок 1.12 показано решение для нескольких частот.

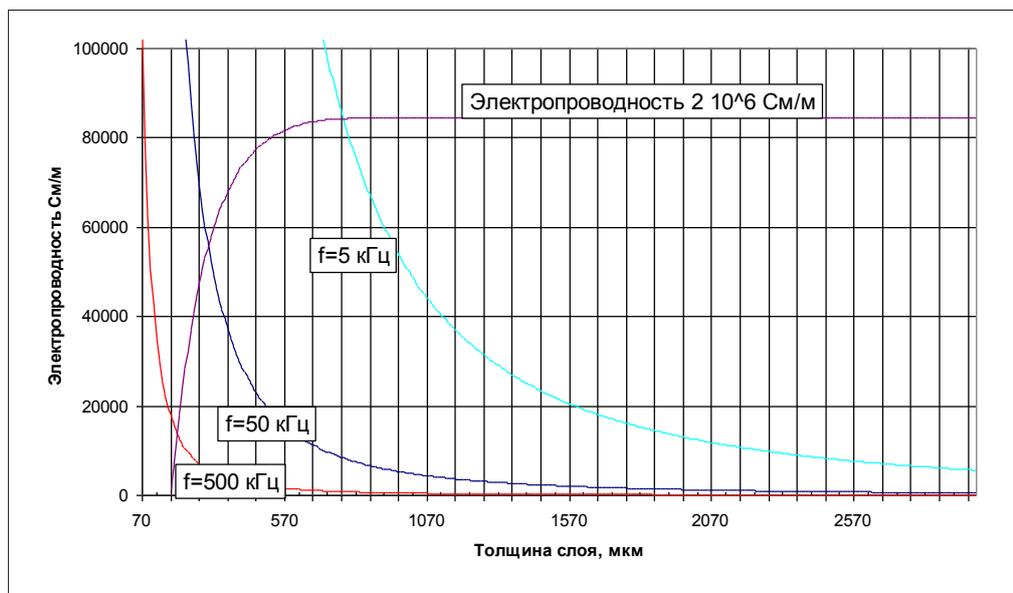


Рисунок 1.12 - Удельная электропроводность и толщина скин-слоя дисперсного материала при различных частотах

Анализируя данные можно заметить что частотный эффект по сопротивлению достигается не только за счет уменьшения сечения протекания тока, но и за счет роста удельного сопротивления материала.

Анализ проведенных предварительных исследований показывает, что идея создания продольного частотно-зависимого резистора за счет скин-эффекта представляется плодотворной. На основе многослойных ферромагнитных материалов возможно получение материала для резистора с сильной зависимостью номинала сопротивления от частоты. Такие резисторы могут найти применение не только при грозозащите энергетических объектов, но и при решении задач электромагнитной совместимости, повышения качества электрической энергии

#### 1.4 Попытки разработки ЧЗУ

В рамках научно-исследовательской работы был проведен анализ патентной литературы. В связи с поставленной задачей патентного поиска в области методов и способов защиты оборудования подстанций от грозовых перенапряжений, поиск

осуществлялся по электронной базе данных Роспатента, базе данных Европейских патентов и по американской базе данных.

В результате поиска были найдены следующие патенты и авторские свидетельства на изобретение для защиты оборудования подстанций от перенапряжений с помощью скин-эффекта.

1. Патент Японии №2-9401. Фудзикара Дэсин К.К. «Сердечник силового кабеля с низкими потерями», 1990 г. [69].

Было предложено выполнять сердечник кабеля из токопроводящих жил, промежутки между которыми заполняются магнитной жидкостью. Взаимоотталкивающее действие намагниченных частиц жидкости приводит к вытеснению магнитных частиц из промежутков между проводящими жилами и от поверхности проводника, что увеличивает эффективность скин-эффекта и потери мощности в жидкости. Основными недостатками данного способа являются высокая сложность изготовления подобного сердечника с герметичной оболочкой, заполненного дорогостоящей жидкостью и, соответственно, его высокая стоимость. Кроме того, увеличенные габариты устройства так же ограничивают возможность его применения.

2. Патент Японии №13-36642, Мэйдэнси К.К., «Токопроводящий элемент», патент Японии №13-36642, 1990 г. [70].

Предложено покрывать токопроводящий элемент ферромагнитной пленкой  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , которая препятствует прохождению переменного тока в проводнике. Однако из множества соединений хрома с кислородом только двуокись хрома  $\text{CrO}_2$  обладает ферромагнитными свойствами и имеет показатель магнитной проницаемости больше 1. Для подавления же высокочастотной электромагнитной волны показатель  $\mu$  должен быть не менее 300.

3. Патент Украины № 45352, Подоляк С. Ю. «Способ изготовления токопроводящего элемента» [71].

Предложено поверхность токопроводящего элемента покрыть оболочкой из смеси диэлектрического полимера с порошками  $\text{CrO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Так как материал оболочки имеет малую удельную электропроводность, то основной ток через

оболочку не проходит. При показателях магнитной проницаемости более 50 и при большой длине токопроводящего элемента парамагнитная оболочка подавляет как поперечную, так и высокочастотную электромагнитные волны.

4. Патент на изобретение №2237333. Белокуров Е.М., Емельянов Н.И., Сарин Л.И., Челазнов А.А., Коробейников С.М., Царегородцев Н.Г., Ильиных М.В., Попов Л.Н. «Устройство для защиты от перенапряжений» 2000 г [72].

Задачей настоящего изобретения является повышение эффективности защиты от перенапряжений.

Поставленная задача решена в способе защиты от перенапряжений, заключающемся в уменьшении в электрической сети амплитуды напряжений, вызванной грозовым импульсом, путем изменения сопротивления устройства защиты, подключенного к защищаемому электрооборудованию, благодаря тому, что подавляют высокочастотную составляющую грозового импульса, при этом устройство защиты подключают последовательно защищаемому электрооборудованию, а также благодаря тому, что в устройстве защиты от перенапряжений, содержащем резистор, резистор выполняют как минимум двухслойным, причем, внутренний слой резистора выполняют из ферромагнитного материала с высокой электропроводностью, а внешний слой выполняют из резистивного слоя ферромагнитного материала.

Внешний слой резистора может быть выполнен из дисперсного ферромагнитного материала, состоящего из двух компонент, одна из которых электропроводна. Концентрация электропроводной компоненты выбирается выше объемного порога протекания, но ниже поверхностного порога протекания.

Заявляемый способ основан на использовании явления “скин-эффекта”, в результате которого под влиянием внешнего электромагнитного поля происходит выталкивание электрического поля и тока из толщи проводника на его поверхность. На низких частотах при отсутствии внешних воздействий ток протекает по всей толще проводника, а под воздействием внешнего источника - только в узком поверхностном слое, поэтому сопротивление на высоких частотах

значительно выше сопротивления на низких частотах, что приводит к поглощению высокочастотной составляющей внешнего электромагнитного поля.

5. Патент РФ № 2284622 «Устройство для защиты от перенапряжений». Авторы патента, Ефимов Б. В., Данилин А. Н., Колобов В. В.[73].

Авторы патента предложили использовать для защиты электрооборудования электрических сетей и подстанций от высокочастотных перенапряжений, в основном коммутационного характера устройство, работающее с использованием скин-эффекта. Устройство содержит двухэлементный коаксиальный резистор, внутренний элемент которого выполнен из неферромагнитного материала с высокой электропроводностью, а наружный элемент - из ферромагнитного материала с высоким удельным сопротивлением ( $\rho > 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), и дополнительный резистор, подключенный параллельно внутреннему элементу коаксиального резистора. Внутренним элементом коаксиального резистора обычно является фазный токоведущий провод, а его наружный элемент выполнен из набора тороидальных ферритовых сердечников, надетых на токоведущий провод. Между ферритовыми сердечниками установлены изолирующие прокладки.

Дополнительный резистор устройства выбирают таким, что он практически не подвержен скин-эффекту и имеет постоянные характеристики во всем диапазоне частот. Он подключен параллельно внутреннему элементу коаксиального резистора. При этом коаксиальный резистор представляет собой индуктивное сопротивление устройства. Поскольку наружный элемент коаксиального резистора выполнен из ферромагнитного материала с высоким удельным сопротивлением ( $> 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) и высокой магнитной проницаемостью (2000), то при возникновении высокочастотного перенапряжения происходит вытеснение высокочастотной составляющей тока в дополнительный резистор, являющийся резистивной составляющей полного сопротивления устройства, где происходит поглощение энергии высокочастотных колебаний.

6. RU 2237333 – Устройство для защиты от перенапряжений [74].

Изобретение относится к области электротехники и предназначено для защиты электрооборудования электрических сетей от перенапряжений, преимущественно грозových. Устройство для защиты от перенапряжений содержит резистор, выполненный многослойным, как минимум двухслойным. При этом один из слоев которого выполнен из неферромагнитного материала с высокой электропроводностью, а другой слой - из ферромагнитного материала, причем ферромагнитный слой нанесен на неферромагнитный слой. Резистор соединен последовательно с защищаемым объектом. Технический результат заключается в повышении эффективности защиты от перенапряжений.

7. Патент РФ на полезную модель №132633 – Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений. Авторы: Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Лавров Ю.А., Лопатин В.В., Брыкин В.П., Коробенкова А.Ю. [75].

Предложено устройство для подавления высокочастотных перенапряжений, содержащее двухслойный резистор, внутренний слой которого выполнен из электропроводного материала с профилированной поверхностью, на которую нанесен слой из ферромагнитного резистивного материала. Резистор выполнен из отдельных элементов, электрически последовательно соединенных между собой. Указанные элементы пространственно расположены таким образом, что они образуют многоугольную катушку, покрытую диэлектрической оболочкой. Профиль элементов выполнен в виде продольных ребер, ориентированных внутрь катушки. Углубления между рёбрами заполнены ферромагнитным диэлектрическим материалом.

8. Попытка создания частотозависимого резистора была предпринята так же в работах [76-80]. Предлагалось наносить ферромагнитный порошок на токопроводящий элемент методом напыления, либо наклеивать, перемешав его с эпоксидной смолой.

Кроме этого особенности скин-слоя в магнитных полях рассмотрены в работе [82].

### **1.5 Постановка задачи исследования**

На основании анализа литературных данных по способам подавления высокочастотных перенапряжений и их характере в условиях севера можно сформулировать следующие задачи исследования:

-разработка макетов ЧЗУ и низковольтные измерения их частотных характеристик;

- компьютерное моделирование оптимальной формы ЧЗУ;

- высоковольтные испытания макета;

-разработка и испытание устройства подавления грозовых перенапряжений для Ноябрьских сетей ОАО «Тюменьэнерго».

## Глава 2. Низковольтные испытания

### 2.1 Оценка влияния скин-эффекта на сопротивление материалов

Для оценки влияния скин-эффекта на сопротивление материала были проведены низковольтные измерения трёх цилиндрических образцов, поперечное сечение оснований которых представлено на рисунке 2.1[82-84]. Первый представлял собой полый цилиндр из алюминия длиной 400 мм диаметром 15 мм с толщиной стенки 2,1 мм. Второй образец был так же изготовлен из алюминиевого цилиндра диаметром 15,4 мм с толщиной стенки 2 мм и имел 8 ребер высотой 15 мм. Толщина каждого ребра у основания составляла 3,8 мм, а в верхней точке 0,3 мм. Третий образец представлял собой полый медный цилиндр длиной 400 мм диаметром 9 мм с толщиной стенки 1,5 мм.

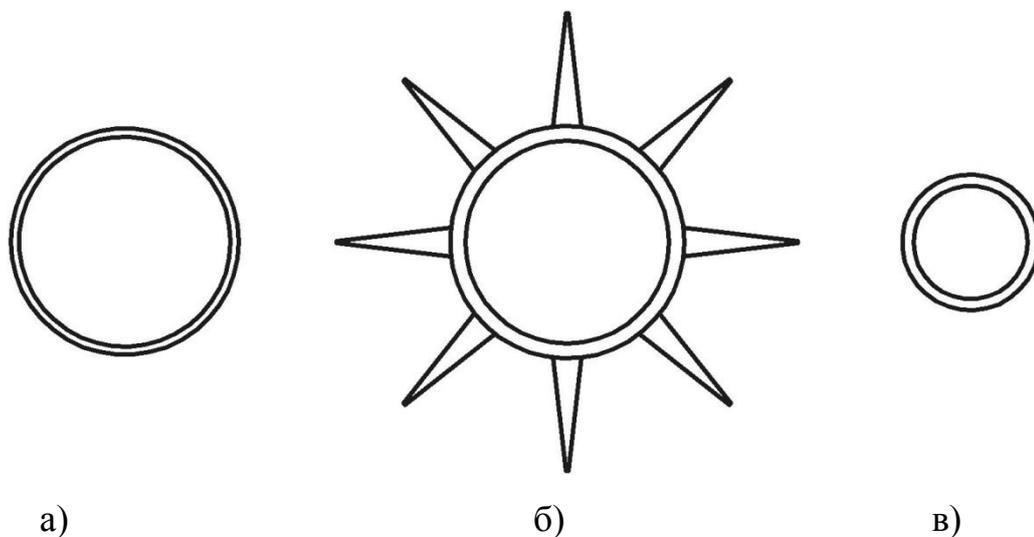


Рисунок 2.1 - Поперечное сечение образцов  
а – алюминиевая трубка; б – алюминиевая трубка с оребрением; в – медная трубка

Измерения проводились с помощью цифрового двухканального осциллографа DS1022С и генератора синусоидальных колебаний по схеме, приведённой на рисунке 2.2.

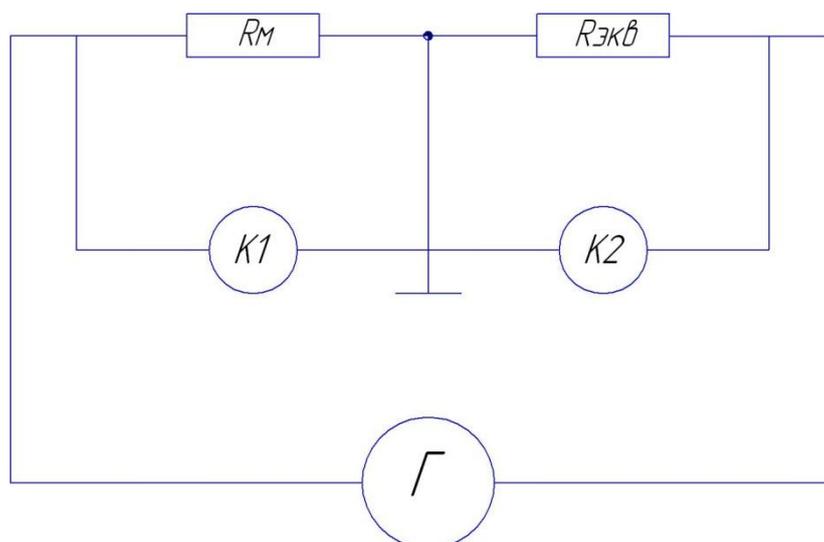


Рисунок 2.2 - Принципиальная схема для проведения низковольтных испытаний

Полное комплексное сопротивление  $Z$  образца определялось сравнением среднеквадратических напряжений, снимаемых каналами  $K1$  и  $K2$  осциллографа с образца  $R_M$  и малоиндуктивного сопротивления  $R_{ш}$  с известным значением сопротивления 10 Ом. Сигнал определённой частоты подавался с генератора SFG-2010 через эквивалентное сопротивление 50 Ом. Расчёт производился по формуле

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

где  $U_M$  – падение напряжения на образце;

$U_{ш}$  – падение напряжения на шунтирующем сопротивлении;

$R_{ш}$  – шунтирующее сопротивление.

Кроме этого, на экране осциллографа марки DS1022C в ручном режиме курсорных измерений, измерялись временные интервалы между данными сигналами. По выражению

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \cdot 360 \quad (2.2)$$

определялось значение сдвига фаз между амплитудами напряжений, снимаемых с образца и сопротивления. Здесь  $\tau$  – временной интервал между

сигналами,  $T$  – период подаваемого сигнала. Зная значения полного комплексного сопротивления  $Z$  и фазового сдвига  $\varphi$  по формулам

$$X = Z \cdot \sin\varphi \quad \text{и} \quad R = Z \cdot \cos\varphi \quad (2.3)$$

рассчитывались значения реактивного  $X$  и активного  $R$  сопротивления образца.

Первоначально измерения проводились на образце, представляющим собой полый алюминиевый цилиндр. Расчётное сопротивление данной алюминиевой трубки при частоте входного сигнала 50 Гц составляло 120 мкОм. С помощью осциллографа измерялось её полное комплексное сопротивление, начиная с частоты входного сигнала в 50 Гц. Зависимость  $Z$  от частоты входного сигнала  $f$  приведена на рисунке 2.3.

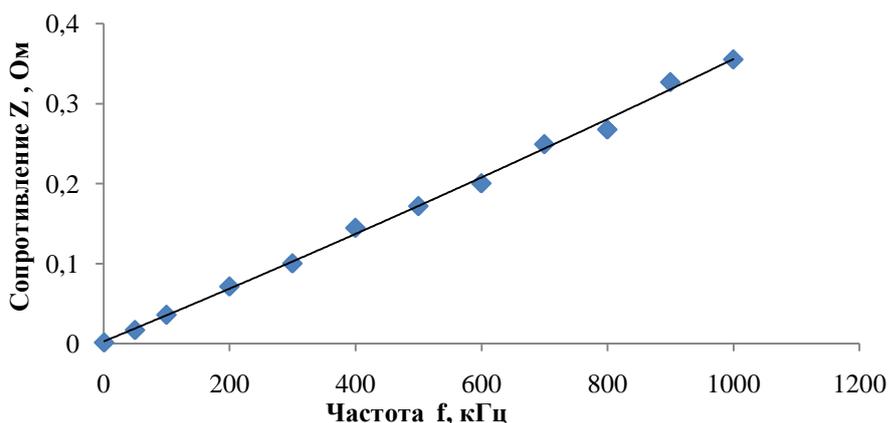


Рисунок 2.3 - Зависимость  $Z$  алюминиевой трубки от  $f$  входного сигнала

Измерения показали, что с увеличением частоты входного сигнала с 50 Гц до 1 МГц сопротивление алюминиевой трубки увеличивается со 120 мкОм на частоте 50 Гц до 0,38 Ом на частоте 1 МГц. Таким образом, скин-эффект увеличивает её сопротивление почти в три тысячи раз.

Несколько больший рост сопротивления наблюдался при проведении измерений на медной трубке. Так со 110 мкОм на частоте 50 Гц сопротивление выросло до 0,4 Ом на частоте 1 МГц.

Наибольший рост сопротивления в зависимости от частоты входного сигнала наблюдался при проведении низковольтных измерений алюминиевой трубки с оребрением. Её сопротивление возрастает со 140 мкОм до 1,1 Ом (рисунок 2.4).

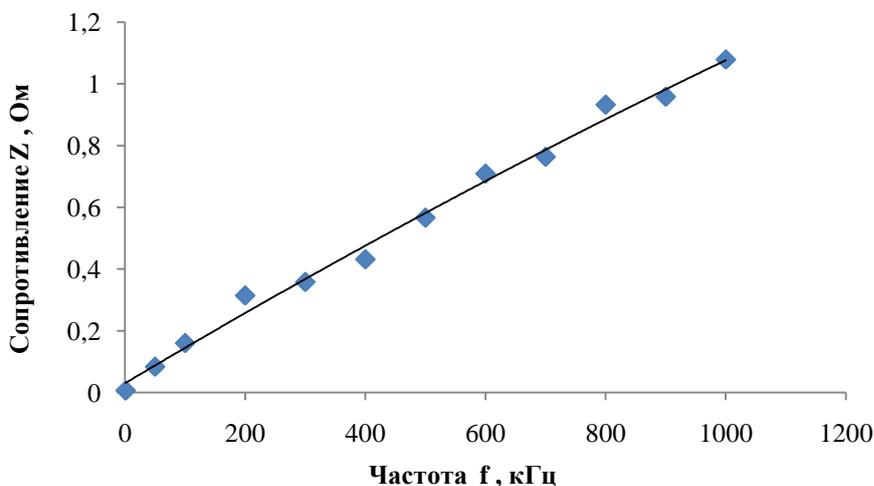


Рисунок 2.4 - Зависимость полного комплексного сопротивления алюминиевой трубки с оребрением от частоты входного сигнала

Параллельно с измерением сопротивления определялось и значение сдвига фаз между амплитудами напряжений снимаемых с трубок и шунтирующего сопротивления

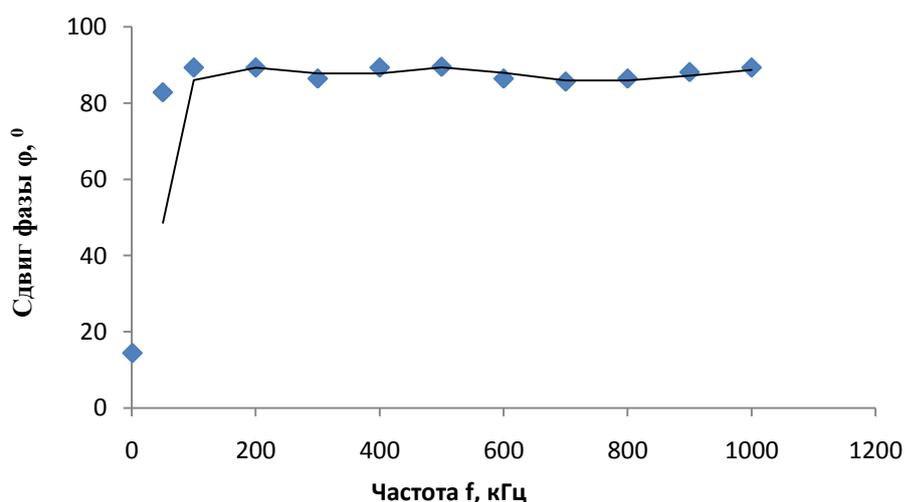


Рисунок 2.5 - Зависимость угла сдвига фаз в зависимости от частоты входного сигнала для алюминиевой трубки

. График зависимости сдвига фазы от частоты входного сигнала (рисунок 2.5) показал, что угол сдвига фаз для алюминиевой трубки увеличивается с  $14^\circ$  на низких частотах до  $80-89^\circ$  на частотах входного сигнала более 50 кГц.

Следовательно, значение полного комплексного сопротивления макета частотозависимого резистора на частотах более 50 кГц в основном определяется реактивной составляющей сопротивления. Это хорошо видно на графиках, представленных на рисунке 2.6, где представлены графики зависимости реактивной  $X$  и активной  $R$  составляющих от частоты входного сигнала для алюминиевой трубки.

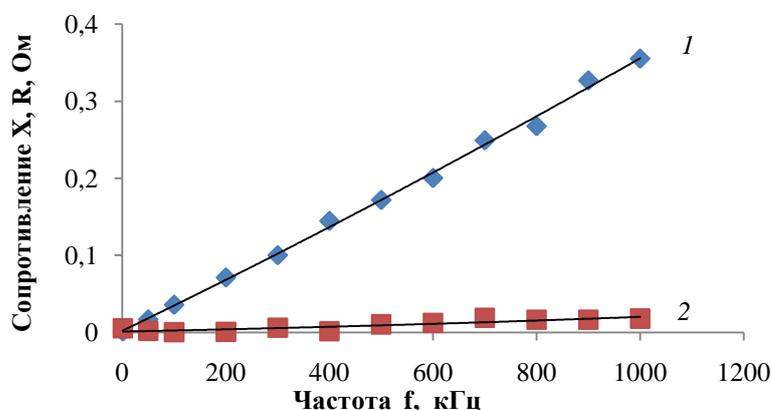


Рисунок 2.6 - Зависимость реактивной и активной составляющих сопротивления алюминиевой трубки от частоты

1 – реактивная составляющая  $X$ ; 2 – активная составляющая  $R$

Так, реактивная составляющая сопротивления увеличивается с 120 мкОм до 0,35 Ом, а активная составляющая до 0,018 Ом, то есть  $R$  с ростом частоты входного сигнала возрастает всего лишь в 150 раз, а не в тысячи раз, как для полного комплексного сопротивления.

Подобные соотношения между реактивными и активными составляющими наблюдаются и при замерах сопротивления остальных образцов. Так, например, на рисунках 2.7 и 2.8 представлены графики зависимости активной и реактивной составляющей сопротивления алюминиевой трубки с оребрением в зависимости от частоты входного сигнала.

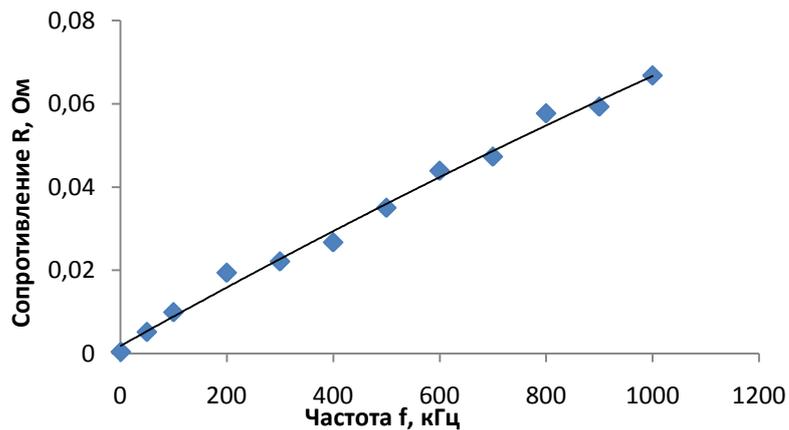


Рисунок 2.7 - Зависимость активной составляющей сопротивления алюминиевой трубки с оребрением от частоты входного сигнала

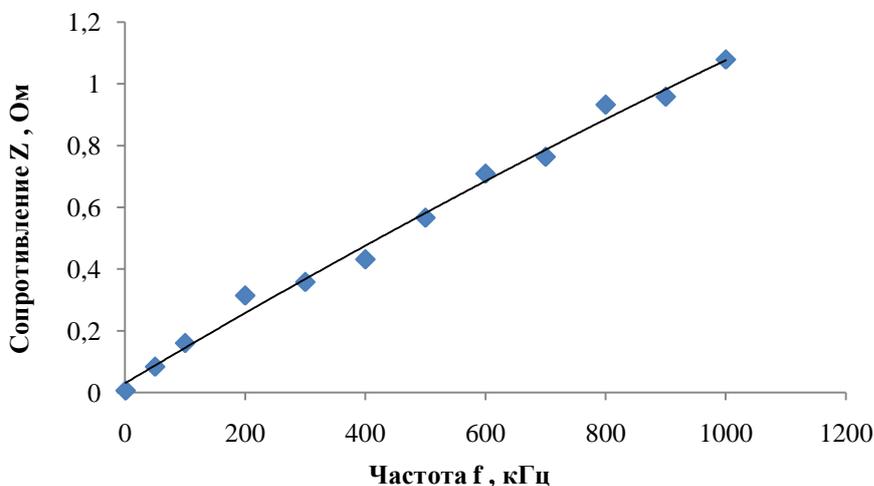


Рисунок 2.8 - Зависимость полного комплексного сопротивления алюминиевой трубки с оребрением от частоты входного сигнала

Как видно из графиков активная составляющая сопротивления трубки с оребрением с ростом частоты входного сигнала с 50 Гц до 1 МГц увеличивается до 0,07 Ом, в то время как её полное комплексное сопротивление увеличивается до 1,1 Ом.

На рисунке 2.9 представлены графики зависимости активного сопротивления всех трёх трубок в зависимости от частоты входного сигнала.

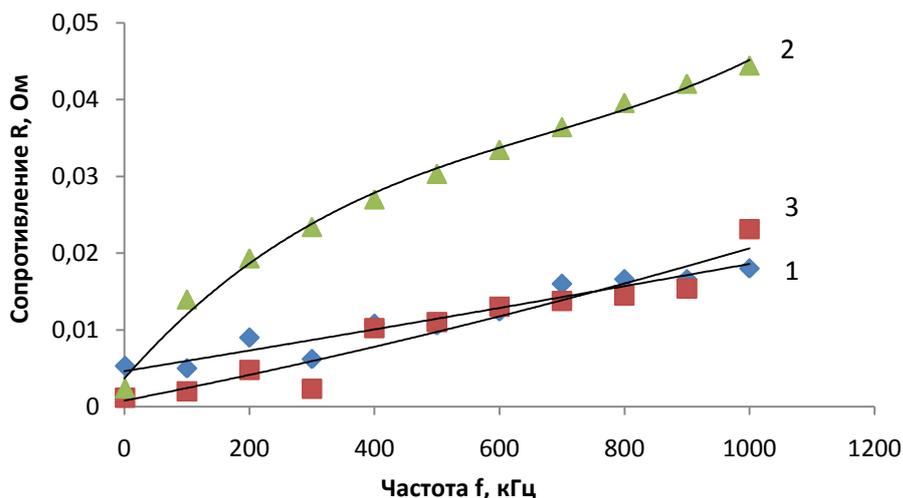


Рисунок 2.9 - Зависимость активной составляющей сопротивления трубок от частоты входного сигнала

1 – алюминиевая трубка, 2 – алюминиевая трубка с оребрением; 3 – медная трубка

Из графиков, приведённых на рисунке 2.9, можно сделать вывод, что на проявление скин-эффекта влияет в первую очередь форма трубки (график 2). Изменение же материала трубки с алюминия на медь, практически не изменило его активное сопротивление. Таким образом, для создания оптимального образца частотозависимого резистора необходимо подобрать оптимальные размеры и оптимальную форму модели.

## 2.2 Скин-эффект в многослойной структуре

Для оценки действия скин-эффекта в многослойных структурах на поверхность всех трёх образцов была прикреплена накладка из аморфной ленты 5БДСР. Данная лента представляет собой нанокристаллический магнитомягкий сплав ( $\text{FeNbCuCoBSi}$ ), получаемым скоростной закалкой расплава на поверхности быстровращающегося охлаждающего барабана. Его достоинствами является высокая индукция при низкой коэрцитивной силе, низкие потери на перемагничивание при высоких частотах, близкая к нулю магнитострикция, высокая магнитная проницаемость, которая зависит от способа термомагнитной

обработки и может достигать значения 50 000, и высокое удельное электросопротивление.

Сплав производится в виде тончайшей ленты шириной 33 мкм, имеющей аморфную (стеклообразную) структуру. После термообработки изделий из ленты происходит кристаллизация сплава с выделением мелких нанокристаллов на фоне аморфной матрицы, определяющих высочайшие магнитные характеристики. Физические свойства ленты представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Физические свойства ленты из аморфных сплавов 5БДСР

Температура Кюри, $^{\circ}\text{C}$	350
Температура начала кристаллизации, $^{\circ}\text{C}$	530
Плотность, $\text{г/см}^3$	7,6
Удельное электрическое сопротивление, $\text{мкОм}\cdot\text{м}$	1,6
Максимальная температура длительного применения, $^{\circ}\text{C}$	240
Индукция насыщения, Тл	1,3

Измерения образцов с намоткой из аморфной ленты проводились по той же схеме, как и измерения однослойной модели. Результаты измерений для алюминиевой трубки в случае намотки ленты 5БДСР и без неё приведены на рисунке 2.10.

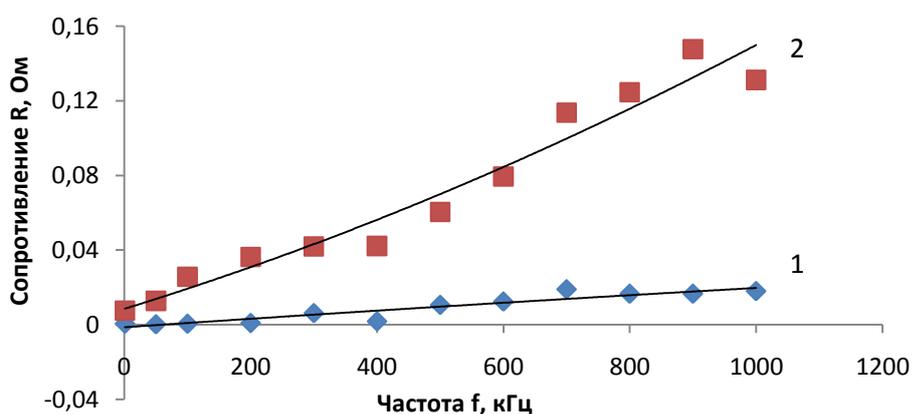


Рисунок 2.10 - Зависимость активной составляющей сопротивления алюминиевой трубки от частоты входного сигнала  
1- без намотки ленты 5БДСР, 2 – с намоткой ленты

Как видно из графиков применение намотки ленты заметно увеличивает активное сопротивление образца на высоких частотах. Так на частоте 1 МГц сопротивление алюминиевой трубки с намоткой ленты увеличивается до 0,13 Ом по сравнению с 0,018 Ом, когда на этой частоте сопротивление трубки измерялось без ленты, то есть более чем в 7 раз. Её полное комплексное сопротивление с лентой 5БДСР на частоте 1 МГц увеличивается 1,7 раза и достигает 0,6 Ом по сравнению с 0,38 Ом в случае измерения сопротивления без ленты (рисунок 2.11).

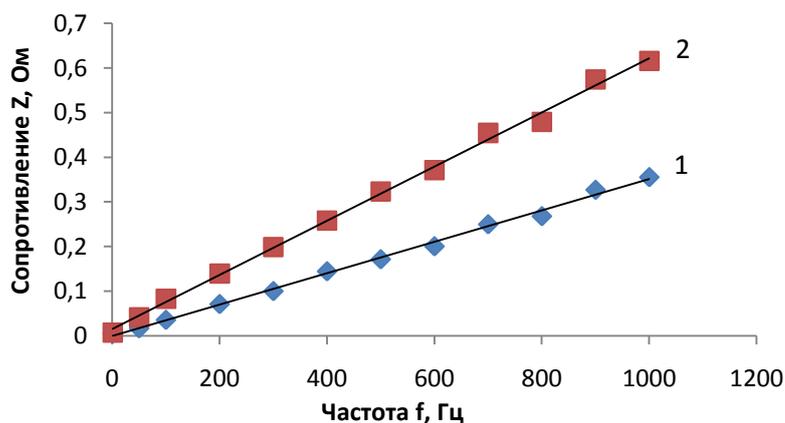


Рисунок 2.11 - Зависимость полного комплексного сопротивления алюминиевой трубки от частоты входного сигнала  
1 – без ленты 5БДСР; 2 – с лентой

Такой же рост сопротивления образца наблюдается и в случае намотки ленты 5БДСР на оребренную и медную трубки.

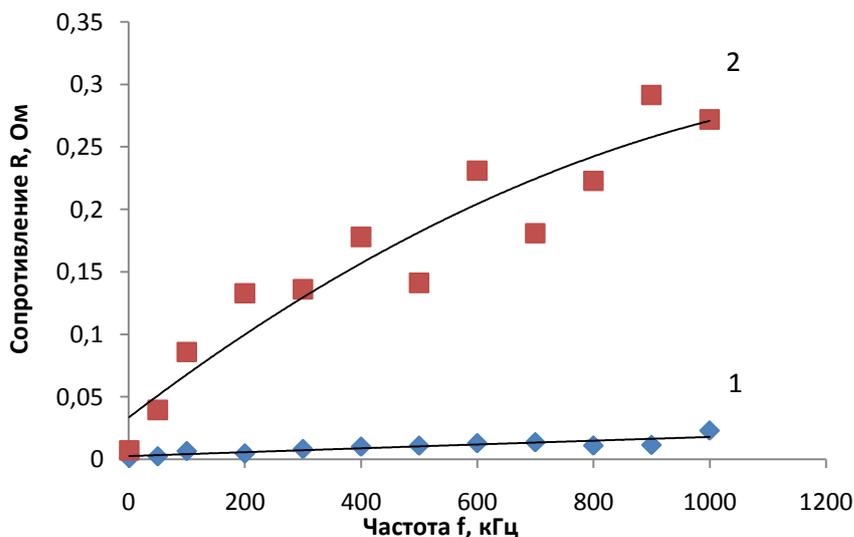


Рисунок 2.12 - Зависимость активной составляющей сопротивления медной трубки от частоты входного сигнала  
1 – без ленты 5БДСР; 2 – с лентой

На рисунках 2.12 и 2.13 приведены графики частотной зависимости активной составляющей и полного комплексного сопротивления медной трубки соответственно.

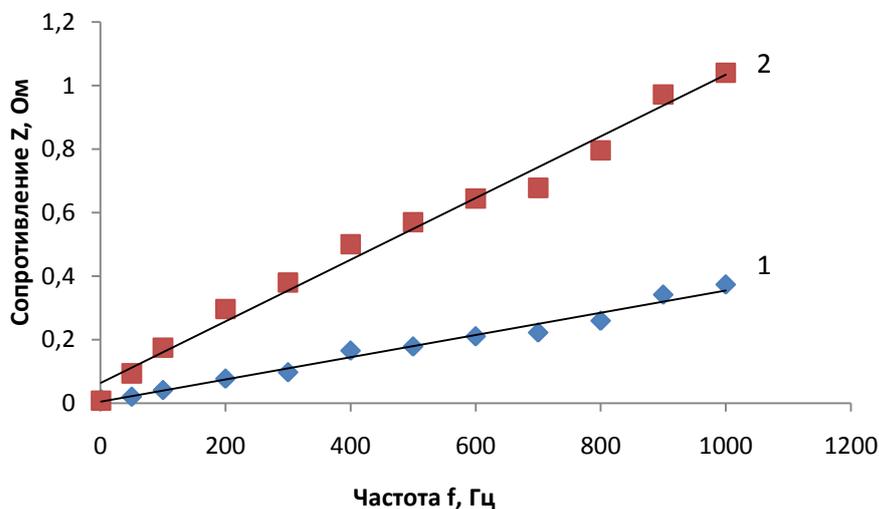


Рисунок 2.13 - Зависимость полного комплексного сопротивления медной трубки от частоты входного сигнала  
1 – без ленты 5БДСР; 2 – с лентой

Активное сопротивление при применении ленты на частоте 1 МГц увеличивается в 15 раз и достигает величины 0,3 Ом. Полное комплексное сопротивление медной трубки с лентой на частоте 1 МГц достигает 1,1 Ом, что практически в три раза больше полного сопротивления этой же трубки без ленты.

На рисунках 2.14 и 2.15 приведены графики зависимости активного сопротивления алюминиевой трубки с оребрением и его полного комплексного сопротивления от частоты входного сигнала соответственно.

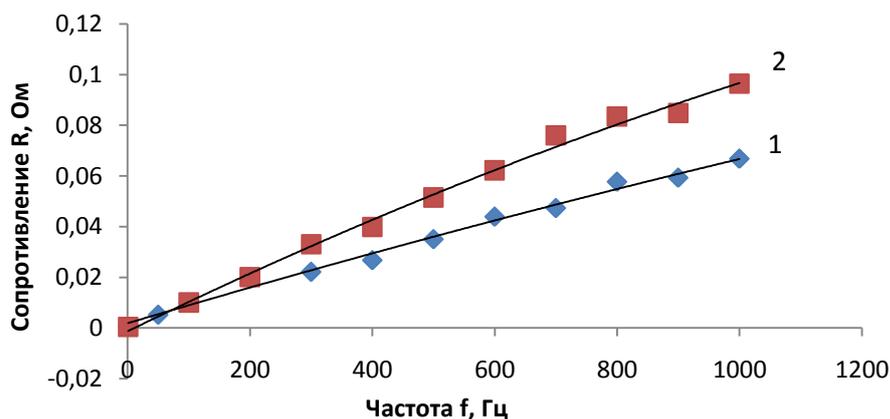


Рисунок 2.14 - Зависимость активного сопротивления алюминиевой трубки с оребрением от частоты входного сигнала  
1 – без ленты 5БДСР; 2 – с лентой

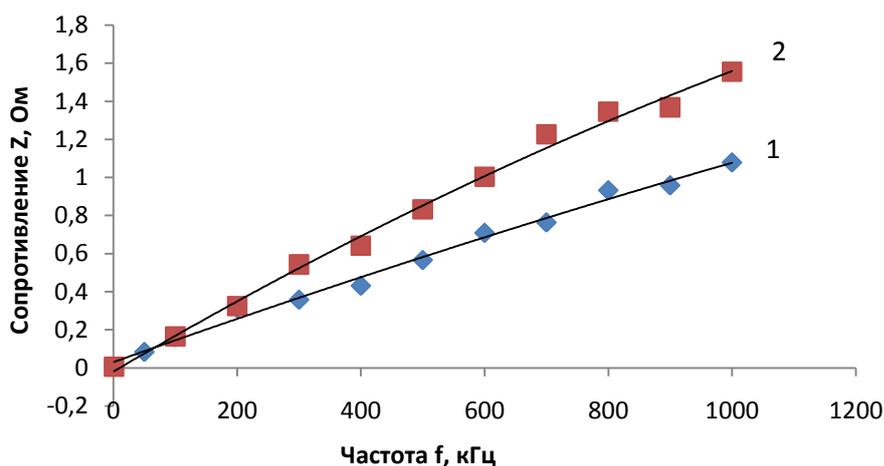


Рисунок 2.15 - Зависимость полного сопротивления алюминиевой трубки с оребрением от частоты входного сигнала  
1 – без ленты 5БДСР; 2 – с лентой

Как видно из графиков активное сопротивление данной трубки с лентой 5БДСР на частоте 1 МГц увеличивается до 0,1 Ом по сравнению с 0,07 Ом без ленты. Полное комплексное сопротивление при этом увеличивается до 1,6 Ом.

Для наглядности результаты измерений активного и полного сопротивления трубок занесены в таблицы 2.2 и 2.3 соответственно. Как видно из таблицы, наибольший рост активной составляющей сопротивления и полного

комплексного сопротивления, как без ленты 5БДСР, так и с лентой наблюдается в алюминиевой трубке с оребрением.

Таблица 2.2 - Результаты измерения активного сопротивления образцов частотозависимого устройства

№ макета	Без ленты 5БДСР			С лентой 5БДСР		
	50 Гц	1 МГц	Рост	50 Гц	1 МГц	Рост
№1	120 мкОм/м	0,02 Ом/м	166	120 мкОм/м	0,13 Ом/м	1083
№2	35 мкОм/м	0,07 Ом/м	2000	35 мкОм/м	0,1 Ом/м	2857
№3	110 мкОм/м	0,02 Ом/м	181	110 мкОм/м	0,3 Ом/м	2727

Таблица 2.3 - Результаты измерения полного сопротивления образцов частотозависимого устройства

№ макета	Без ленты 5БДСР			С лентой 5БДСР		
	50 Гц	1 МГц	Рост	50 Гц	1 МГц	Рост
№1	120 мкОм/м	0,4 Ом/м	3333	120 мкОм/м	0,6 Ом/м	5000
№2	139 мкОм/м	1,1 Ом/м	7913	139 мкОм/м	1,6 Ом/м	11510
№3	110 мкОм/м	0,4 Ом/м	3636	110 мкОм/м	1,1 Ом/м	10000

Анализируя результаты низковольтных измерений в двухслойных образцах, можно сделать следующие выводы:

- наибольший рост активного и полного сопротивления с ростом частоты по-прежнему наблюдается в алюминиевой трубке с оребрением, то есть проявление скин-эффекта в основном зависит от формы трубки;

- применение ленты 5БДСР значительно увеличивает активное и полное сопротивление медной трубки по сравнению с алюминиевой, то есть увеличивается значение материала основания образца.

Для проведения низковольтных измерений в трёхслойной структуре в трубке с оребрением между ребрами основания с приклеенными накладками из ленты 5БДСР толщиной 0,025 мм был засыпан ферромагнитный порошок с магнитной проницаемостью порядка 5. Таким образом, был получен частотозависимый резистор, составленный из композиции проводящего (алюминиевый макет) и непроводящего ферромагнитного материала. По результатам замеров полного

комплексного сопротивления и его активной составляющей для данного образца были построены графики, приведенные на рисунке 2.16.

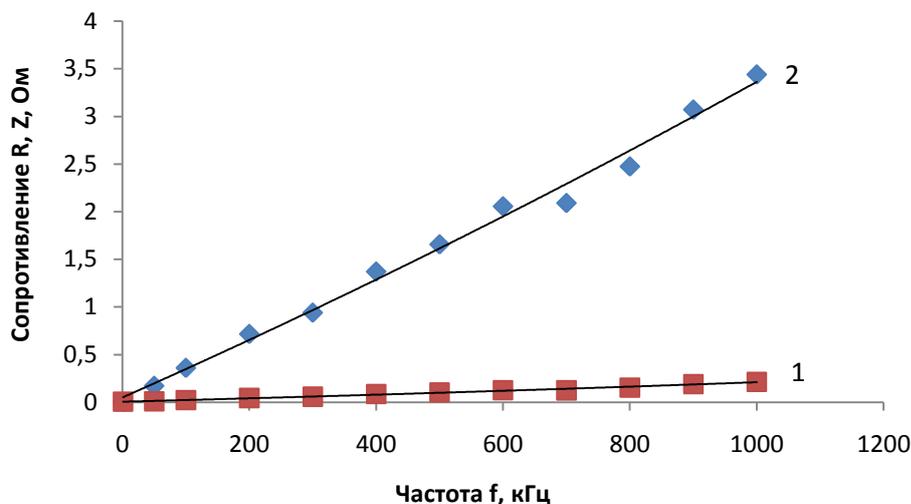


Рисунок 2.16 - Зависимость R и Z алюминиевой трубки с оребрением от частоты входного сигнала при засыпке макета ферромагнитным порошком

1 – активная составляющая сопротивления; 2 – полное комплексное сопротивление

Как видно из графиков, применение засыпки из ферромагнитного порошка также приводит к увеличению сопротивления трубки на высоких частотах.

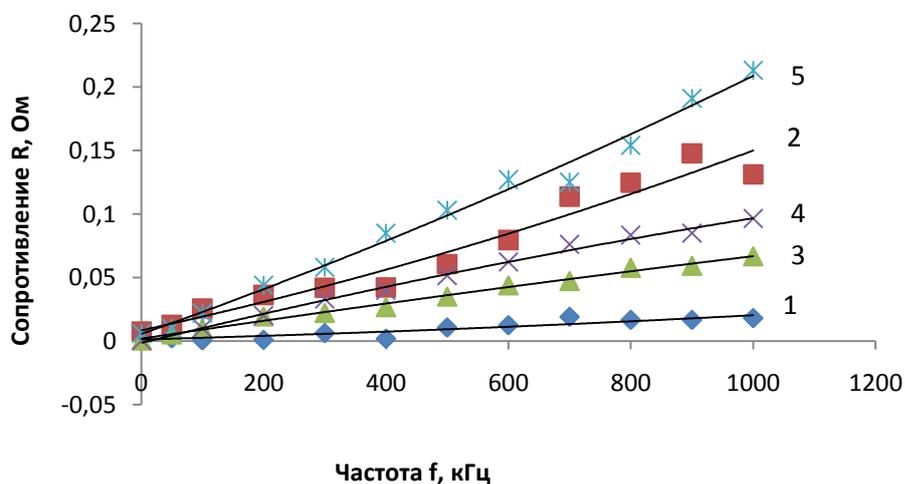


Рисунок 2.17 - Зависимость активного сопротивления R алюминиевых трубок от частоты входного сигнала

1 – алюминиевая трубка без ленты 5БДСР; 2 – алюминиевая трубка с лентой 5БДСР;  
 3 – алюминиевая трубка с оребрением без ленты 5БДСР; 4 – алюминиевая трубка с оребрением с лентой 5БДСР; 5 – алюминиевая трубка с оребрением с лентой 5БДСР и засыпкой ферромагнитным порошком

Так её активное сопротивление увеличилось с 41 мкОм до 0,2 Ом, то есть возросло более чем в пять тысяч раз. Еще больший рост наблюдается для полного комплексного сопротивления. Оно возросло почти в 18 тысяч раз со 195 мкОм до 3,5 Ом.

Для наглядности результаты измерения активного сопротивления каждой трубки сведём в один график, представленный на рисунке 2.17.

Как видно из графиков, наибольший рост активного сопротивления наблюдается в алюминиевой трубке с оребрением при использовании ленты 5БДСР и засыпке ферромагнитным порошком пустот между ребрами трубки.

### **2.3 Выводы по главе 2**

Таким образом, результаты низковольтных измерений образцов частотозависимого резистора показывают, что на его сопротивление можно влиять тремя способами:

1. Изменением формы образца;
2. Применением накладок из ферромагнитной ленты с высокой магнитной проницаемостью.
3. Засыпкой образца ферромагнитным порошком.

## Глава 3. Компьютерное моделирование

### 3.1 Математическая постановка формулировки задачи программы

Результаты низковольтных измерений показали, что одним из основных способов увеличения сопротивления частотозависимого резистора в зависимости от частоты является увеличение площади его поверхности [83]. Этого можно добиться либо простым увеличением диаметра основания резистора, либо изменением его формы. Однако любое изменение формы конструкции требует изготовления практически нового образца, что является очень затратным по времени и материалам. Поэтому для моделирования частотозависимого резистора была разработана специальная компьютерная программа, позволяющая изучить распределение электромагнитного поля и поведение характеристик поля в резисторе [85, 86], Расчёты производились методом конечных элементов [87], неоспоримым преимуществом которого, является возможность задания нерегулярных и неортогональных сеток, что позволяет более точно описать геометрию расчётной области.

Математическая постановка формулировки задачи данной программы сводилась к необходимости изучить распределение электромагнитного поля и поведение характеристик поля в техническом устройстве, представляющим собой кабель сложной конструкции. Схематический вид конструкции изображен на рисунке 3.1.

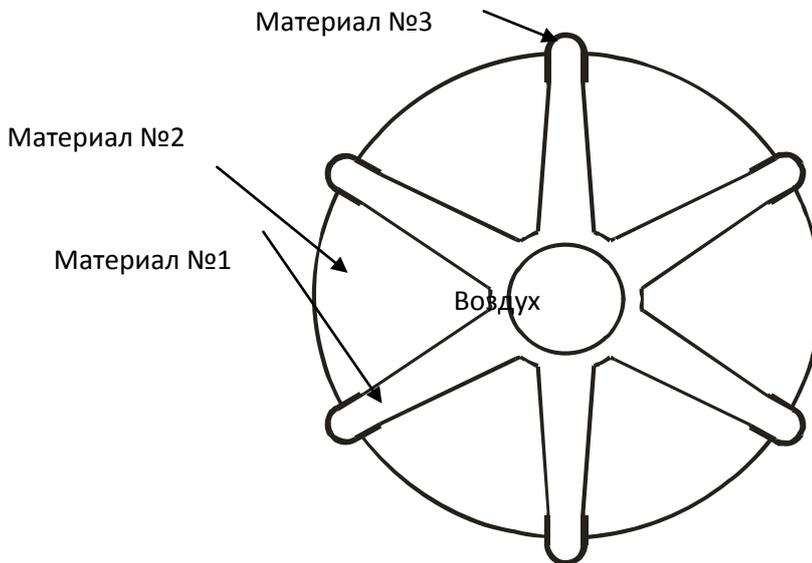


Рисунок 3.1 - Схематический вид конструкции

Конструкция состоит из следующих материалов:

-материал № 1 – алюминиевая подложка («лепестки» и «основание») с относительной магнитной проницаемостью  $\mu=1$  и удельной проводимостью  $\sigma = 3.6 * 10^7$  См/м;

-материал № 2 – непроводящий материал-диэлектрик (заполнитель) с небольшой относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ , которая будет изменяться от 1 до 100;

-материал № 3 – «насадка» - покрытие из проводящего материала с высокой относительной магнитной проницаемостью  $\mu$  и удельной проводимостью  $\sigma$ . Данные параметры могут меняться.

Математическая модель программы основывается на том, что нестационарное электромагнитное поле описывается краевой задачей для параболического уравнения:

$$-\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}\bar{A}\right) + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = \bar{J} \quad (3.1)$$

В данном случае задача рассматривается на довольно поздних временах, поэтому токи смещения (то есть вторая производная) не учитываются.

В этом уравнении векторная функция  $\bar{A} = (A_x, A_y, A_z)$  – это вектор-потенциал электромагнитного поля, каждая компонента которого зависит от координат  $x, y, z$  и времени  $t$ .

Магнитная проницаемость среды  $\mu = \mu_r \mu_0$ , где  $\mu_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}}$  – это магнитная проницаемость вакуума, а  $\mu_r$  – это относительная магнитная проницаемость, представляющая собой отвлеченное число, показывающее отношение величины магнитной проницаемости данного вещества к магнитной проницаемости воздуха [88,89]. Коэффициент  $\sigma$  – это коэффициент удельной проводимости среды,  $\bar{J}$  – сторонний ток, который задается в накладке и в алюминиевой конструкции.

При этом сторонний ток и напряжение, подаваемое на систему, связаны следующими соотношениями:

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad}V, \quad (3.2)$$

где  $\dot{A}$  – это напряженность электрического поля, которая складывается из стороннего поля и наведенного, то есть поля, которое получается в результате электромагнитного взаимодействия.

При умножении  $\text{grad}V$  на коэффициент удельной проводимости среды  $\sigma$  получим сторонний ток  $J$ :

$$J^{\text{нб}} = \sigma \cdot \text{grad}V \quad (3.3)$$

В свою очередь  $\text{grad}V$  – величина удельная и измеряется в В/м, то есть получается из соотношения, где  $U$  – напряжение, а  $l$  – длина:

$$U = \text{grad}V \cdot l, (\hat{A}) \quad (3.4)$$

Так как мы рассматриваем сечение кабеля, а его длину считаем бесконечной, то  $l$  мы учитывать не будем, и все величины будем считать удельными. Напряжение  $U$  в данном случае исполняет роль множителя, поэтому для простоты вычислений примем равным его единице:

$$|U| = 1. \quad (3.5)$$

Сторонний ток в итоге будет задаваться с учетом соотношений (3.3) и (3.4). При этом, если учитывать еще и соотношение (3.5), то значение стороннего тока по модулю следует брать равным  $\sigma$ .

Будем считать, что сторонний ток распределяется по гармоническому закону, то есть имеет вид:

$$\bar{J}(x, y, z, t) = \bar{J}^s(x, y, z) \sin(w \cdot t) + \bar{J}^c(x, y, z) \cos(w \cdot t) \quad (3.6)$$

Следовательно, вектор потенциал, являющийся решением задачи (3.1), также следует искать в виде:

$$\bar{A}(x, y, z, t) = \bar{A}^s(x, y, z) \sin(w \cdot t) + \bar{A}^c(x, y, z) \cos(w \cdot t) \quad (3.7)$$

Поэтому, последовательно преобразовав искомое уравнение (3.1) путем подстановки в него уравнений (3.6) и (3.7), и, учитывая, что:

$$\begin{aligned} \sigma \frac{\partial \bar{A}^s(x, y, z) \sin(w \cdot t) + \bar{A}^c(x, y, z) \cos(w \cdot t)}{dt} = \\ = \sigma \bar{A}^s(x, y, z) \cos(w \cdot t) - \sigma \bar{A}^c(x, y, z) \sin(w \cdot t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

и

$$\begin{aligned} -\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(\bar{A}^s(x, y, z) \sin(w \cdot t) + \bar{A}^c(x, y, z) \cos(w \cdot t))\right) = \\ = -\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(\bar{A}^s(x, y, z))\right) \sin(w \cdot t) - \operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(\bar{A}^c(x, y, z))\right) \cos(w \cdot t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

получим:

$$\begin{aligned} -\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(\bar{A}^s(x, y, z)) - \sigma \bar{A}^c(x, y, z)\right) \sin(w \cdot t) - \\ -\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(\bar{A}^c(x, y, z)) + \sigma \bar{A}^s(x, y, z)\right) \cos(w \cdot t) = \\ = \bar{J}^s(x, y, z) \sin(w \cdot t) + \bar{J}^c(x, y, z) \cos(w \cdot t) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Сгруппируем члены уравнения по  $\sin(w \cdot t)$  и  $\cos(w \cdot t)$ . Таким образом, исходное уравнение можно разделить на два, и решать их независимо для каждой составляющей тока.

$$\begin{cases} -\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}\bar{A}^s(x, y, z)\right) - \sigma w \bar{A}^c(x, y, z) = \bar{J}^s(x, y, z) & / \cdot \sin(\omega t) \\ -\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}\bar{A}^s(x, y, z)\right) + \sigma w \bar{A}^s(x, y, z) = \bar{J}^c(x, y, z) & / \cdot \cos(\omega t) \end{cases} \quad (3.11)$$

Так как считаем, что потока поля через внешнюю границу провода нет, то на внешней круглой границе будем использовать вторые однородные краевые условия:

$$\frac{\partial A^s}{\partial n} \Big|_{\bar{A}} = \frac{\partial A^c}{\partial n} \Big|_{\bar{A}} = 0 \quad (3.12)$$

Так как мы рассматриваем сечение бесконечно длинного провода, то от компоненты  $z$  значение поля  $A$  не зависит, то есть в любом сечении провода распределение потенциала будет зависеть только от координат  $x$  и  $y$ .

Поэтому компоненты вектор-потенциала  $A$  будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \bar{A}^s &= (A_x(x, y, z), A_y(x, y, z), A_z(x, y, z)) = (0, 0, A_z^s(x, y)) \\ \bar{A}^c &= (A_x(x, y, z), A_y(x, y, z), A_z(x, y, z)) = (0, 0, A_z^c(x, y)) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Здесь и далее будем их обозначать как  $A_z^s(x, y)$  и  $A_z^c(x, y)$ .

Итак, система уравнений теперь примет вид:

$$\begin{cases} -\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(A_z^s(x, y))\right) - \sigma w A_z^c(x, y) = J^s(x, y) & / \cdot \sin(\omega t) \\ -\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad}(A_z^c(x, y))\right) + \sigma w A_z^s(x, y) = J^c(x, y) & / \cdot \cos(\omega t) \end{cases} \quad (3.14)$$

После того, как, решив систему уравнений, мы получим значение потенциала  $A$ , необходимо будет получить значение полного тока, с помощью компонент которого можно будет получить искомое значение сопротивлений кабеля, активного и индуктивного.

### 3.2. Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами низковольтных измерений

Создание компьютерной программы позволило удостовериться в правильности результатов низковольтных измерений. Задавая программе геометрические размеры, значения сопротивления и электрическую проницаемость материала всех трёх образцов были получены расчётные данные по сопротивлению образцов на различных частотах.

Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами низковольтных измерений, представленное на рисунке 3.2, показало хорошее совпадение вплоть до частоты 1 МГц. Это позволило использовать моделирование для определения оптимальной формы и размеров частотозависимого устройства.

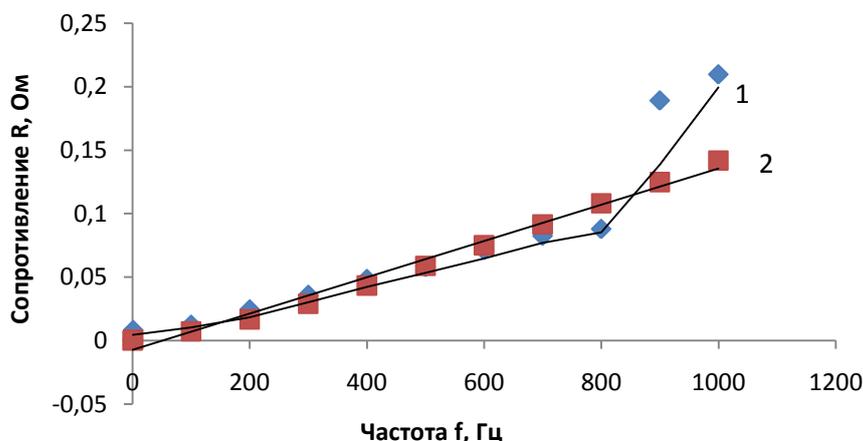


Рисунок 3.2 - Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами низковольтных измерений

1- результаты низковольтных измерений; 2 – результаты компьютерного моделирования

Расчёты проводились для частот 50 Гц, 100 кГц, 300 кГц и 1 МГц. Данные частоты были выбраны потому, что являются характерными для различных типов перенапряжения. Так частоты 100-300 кГц наиболее характерны для грозовых перенапряжений, а частота 1 МГц для коммутационных перенапряжений.

### 3.3 Определение зависимости сопротивления образца от его геометрических размеров при компьютерном моделировании

В процессе компьютерного моделирования изменялись следующие геометрические характеристики устройства: площадь основания, длина и площадь луча, а также само количество лучей макета. Естественно, что на низких частотах любое изменение формы устройства, приводящее к увеличению площади поперечного сечения, приводило к уменьшению его сопротивления. На высоких же частотах большее влияние на значение сопротивления оказывало количество и форма лучей. Так, например, на рисунке 3.1 приведена зависимость погонного активного сопротивления устройства от количества лучей при неизменной площади его основания при частотах входного сигнала 1 МГц, 300 кГц и 100 кГц.

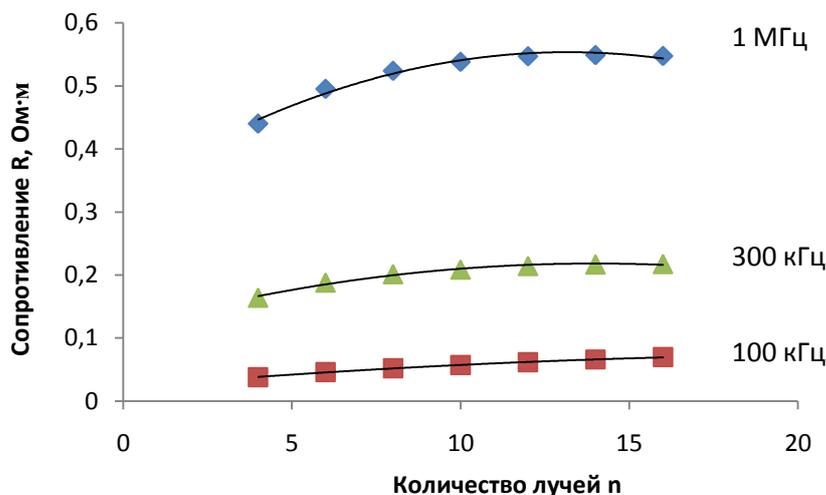


Рисунок 3.1 - Зависимость активного сопротивления устройства от количества его лучей

Графики показывают, что активное сопротивление имеет свой максимум при определенном количестве лучей, причем это оптимальное количество зависит от частоты входного сигнала. Так, например, для входных сигналов частотой 1 МГц пик сопротивления приходится на  $n=14$ , а для сигналов частотой 300 кГц оптимальным количеством лучей является 16.

Компьютерное моделирование показало, что для увеличения сопротивления частотнозависимого устройства на каждой из заданных частот хотя бы в 10 000 раз требуется различная форма резистора. Так на частоте 1 МГц для этого необходимо, как минимум, 8 лучей, для частоты 300 кГц потребуется 14 лучей, а для частоты 100 кГц необходимо уже увеличить не только количество лучей до 36, но и увеличить соответственно и диаметр основания.

Результаты моделирования по определению оптимальной длины луча, его площади, а также оптимальной площади основания подтвердили, что для входных сигналов различной частоты существует своя оптимальная форма. Так, например, наибольшей величины сопротивления устройства при частоте входного сигнала 1 МГц можно добиться если оно имеет форму приведённую на рисунке 3.3а.

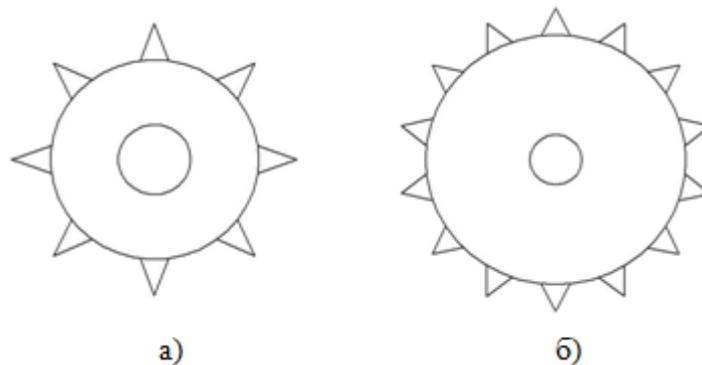


Рисунок 3.3 - Оптимальная форма частотнозависимого устройства  
а – при частоте входного сигнала 1 МГц; б – при частоте входного сигнала 300 кГц

Толщина его основания должна составлять 40 мм, внутренний радиус основания – 14 мм, устройство должно иметь 8 лучей длиной 15 мм с шириной основания луча 11 мм. При такой форме активное сопротивление частотнозависимого устройства на частоте 1 МГц должно возрасть более чем в 24 000 раз с 0,00001088 Ом при частоте входного сигнала 50 Ом до 0,267589 Ом.

Для подобного увеличения сопротивления на частоте 300 кГц форма частотнозависимого устройства должна быть следующей (рисунок 3.3б): толщина основания 50 мм, внутренний радиус 10 мм, количество лучей 14, длина луча 11 мм. Для частоты входного сигнала 100 кГц толщина основания должна быть не менее 56 мм, внутренний радиус – 6 мм, количество лучей – 36, длина луча 7.5 мм.

Подобная форма частотнозависимых устройства обеспечит рост сопротивления на перечисленных частотах более чем в 20 000 раз. Таким образом, только изменяя форму устройства, можно добиться существенного увеличения его сопротивление на высоких частотах[42].

Кроме моделирования формы частотозависимого устройства моделировалось так же влияние на сопротивление макета наличие накладок из аморфной ленты 5БДСР различной толщины и использование ферромагнитного порошка, засыпаемого между лучами макета.

### **3.4 Определение характеристик 28-лучевого частотозависимого устройства**

Достоверность проведенных расчетов подтверждается измерениями на макетах. Первым макетом, досконально рассчитанным и измеренным, был макет многолучевого устройства, форма которого представляла на рисунке 3.4. Макет резистора выполнен из алюминия, имеет цилиндрическое основание длиной 1 метр, диаметром 21 мм, с которым соединены продольные лучи высотой 10 мм. К лучам крепятся накладки из ленты 5БДСР толщиной 25 мкм, в количестве от 1 до трех с каждой стороны. Пространство между ребер может быть заполнено ферромагнитным диэлектрическим порошком.

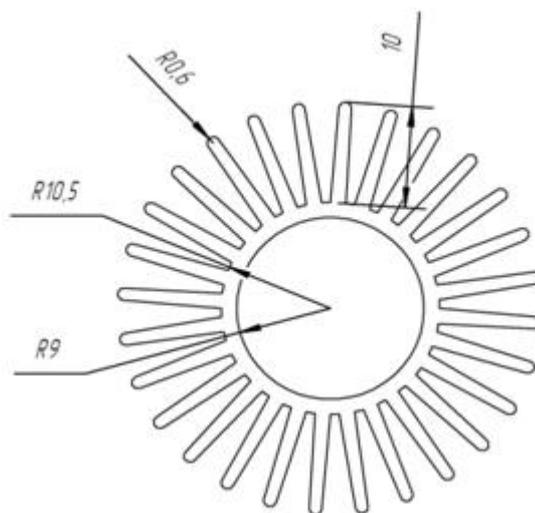


Рисунок 3.4 - Поперечное сечение 28 лучевого устройства

Были изготовлены три образца 28-лучевого устройства данной формы. Измерения сопротивления одного образца проводилось без укладки аморфной ленты 5БДСР, вдоль лучей второго и третьего образца была уложена аморфная лента толщиной 0,025 и 0,075 мм соответственно.

По результатам расчётов компьютерного моделирования погонное сопротивление данного образца устройства без ленты 5БДСР и при различной толщине ленты, уложенной вдоль лучей, должно иметь значения, приведенные в табл. 3.1, 3.2 и 3.3

Таблица 3.1- Расчётные значения сопротивлений 28-лучевого ЧЗУ без ленты 5БДСР и без засыпки ферромагнитным порошком

F, кГц	R, Ом/м	X, Ом/м	Z, Ом/м
0,05	$3.5e^{-5}$	$9.9e^{-5}$	0.0001
123	0.002	0.14	0.14
320	0.004	0.37	0.37
1160	0.008	1.36	1.36

Таблица 3.2 - Расчётные значения сопротивлений 28-лучевого ЧЗУ при  $h=0.025$  без засыпки ферромагнитным порошком

F, кГц	R, Ом/м	X, Ом/м	Z, Ом/м
0,05	$3.4e^{-5}$	0.00014	0.00014
123	0.018	0.3	0.3
320	0.065	0.75	0.75
1160	0.328	2.53	2.55

Таблица 3.3 - Расчётные значения сопротивлений 28-лучевого ЧЗУ при  $h=0.075$  без засыпки ферромагнитным порошком

F кГц)	R (Ом/м)	X(Ом/м)	Z (Ом/м)
0,05	$3.4e^{-5}$	0.00014	0.00015
123	0.029	0.309	0.31
320	0.13	0.745	0.757
1160	0.569	2.287	2.357

Распределение электромагнитного поля и поведение характеристик поля в 28-лучевом устройстве с накладками из ленты 5БДСР толщиной 0,075 мкм и без засыпки ферромагнитным порошком можно наблюдать на рисунках 3.5, 3.6, 3.7 и 3.8. Так, на рисунках 3.5 и 3.6 видно, что средняя плотность магнитной индукции в устройстве составляет 0,026 Тл при частоте 50 Гц и уменьшается до  $3,9 \cdot 10^{-6}$  Тл на частоте 300 кГц. Для наглядности на рисунках 3.7 и 3.8 представлено распределение магнитной индукции на вершине лучей устройства. Видно, что при частоте 50 Гц (рисунок 3.7) магнитная индукция увеличивается от 0,048 Тл (красный цвет) до 0,09 Тл (зелёный цвет). По распределению магнитной индукции можно сделать вывод, что сила тока в поверхностном слое луча устройства в 2-3 раза превышает силу тока в его основании. При частоте 300 кГц магнитная индукция на поверхности луча увеличивается более чем на два порядка с  $3,9 \cdot 10^{-6}$  Тл до  $1,3 \cdot 10^{-4}$  (рисунок 3.8), то есть практически весь ток проходит по накладке из аморфной ленты, обладающей большим сопротивлением, чем основание устройства.

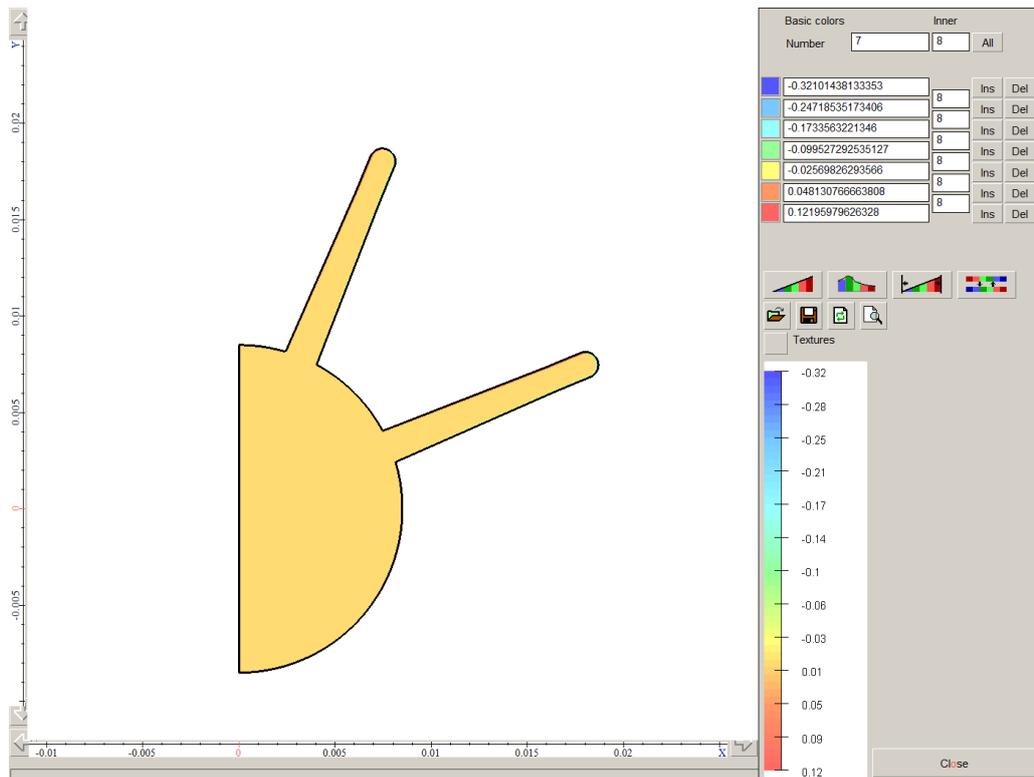


Рисунок 3.5 - Общее распределение электромагнитного поля по сечению устройства при  $f = 50$  Гц

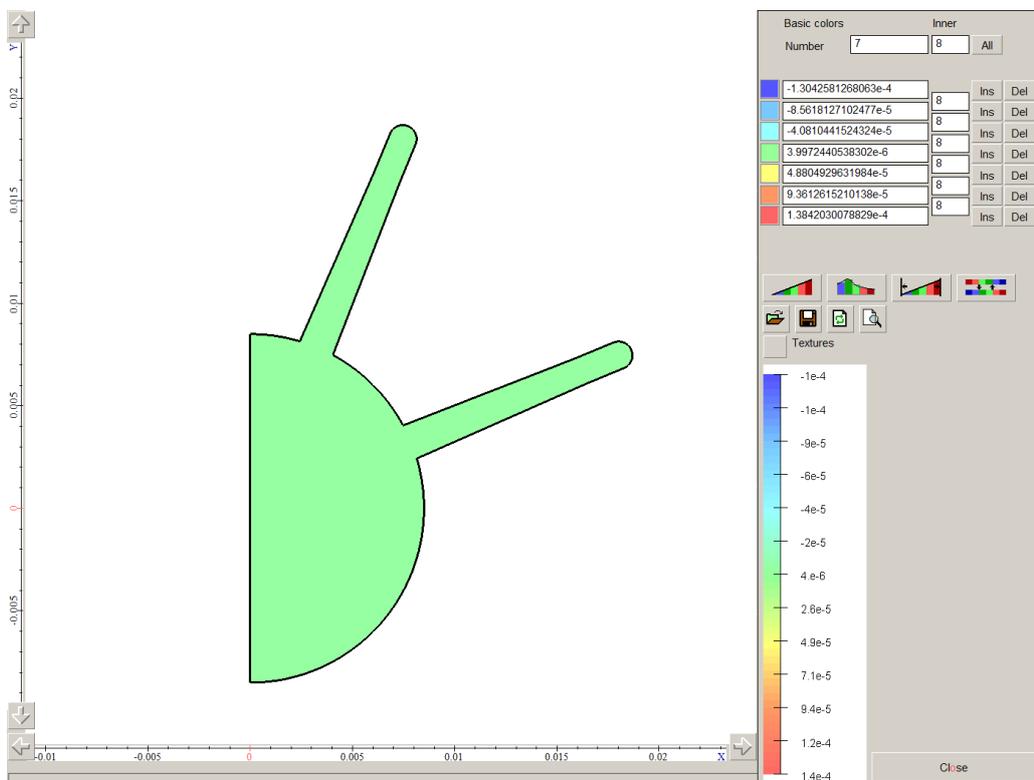


Рисунок 3.6 - Общее распределение электромагнитного поля по сечению устройства при  $f = 300$ кГц

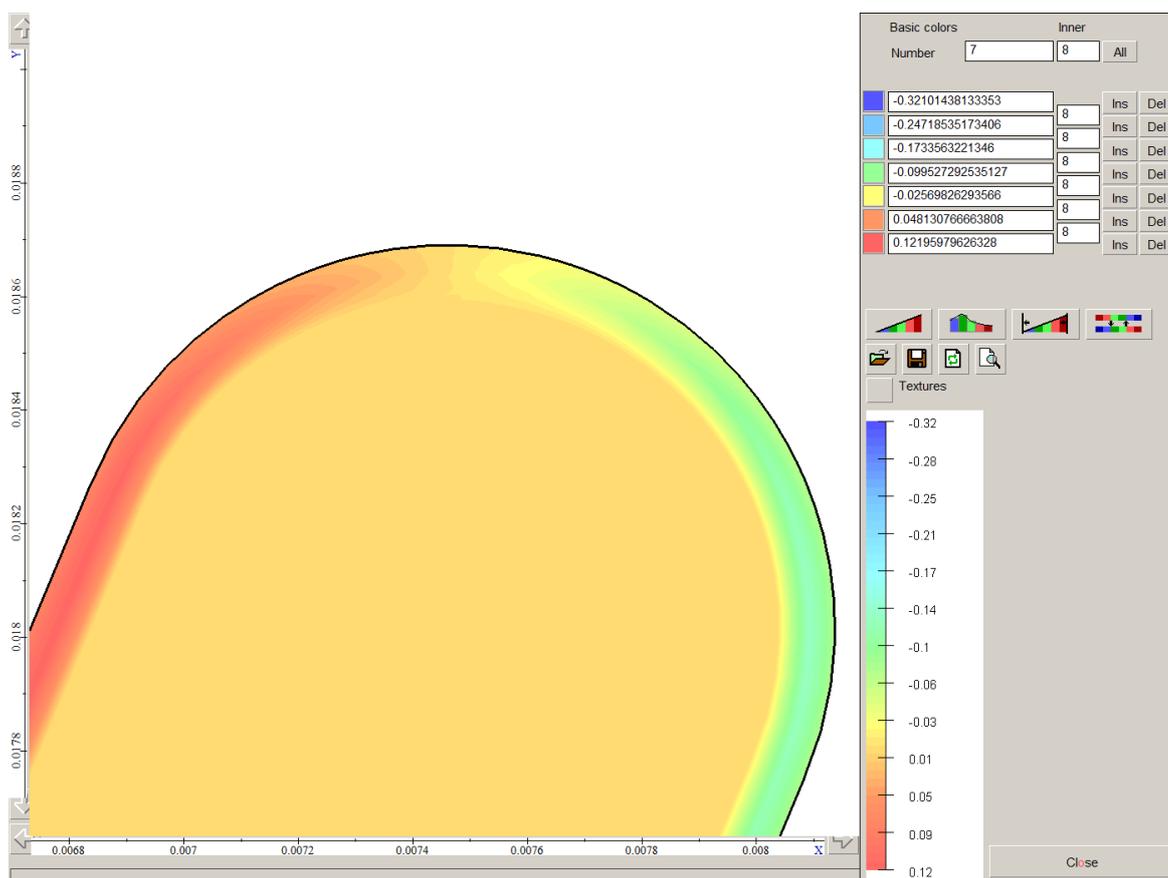


Рисунок 3.7 - Распределение электромагнитного поля по фрагменту луча устройства при  $f = 50$  Гц

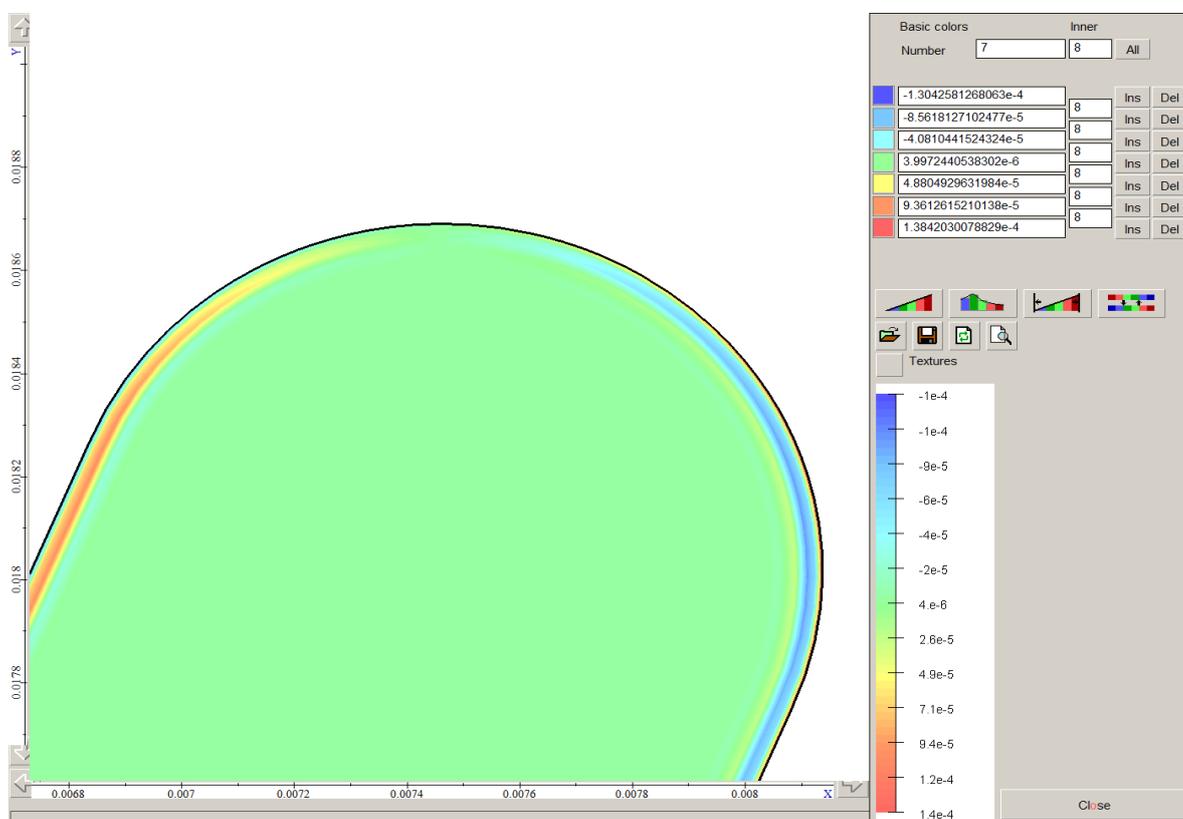


Рисунок 3.8 - Распределение электромагнитного поля по фрагменту луча устройства при  $f = 300$ кГц

Тем не менее, расчётная величина сопротивления 28-лучевого частотозависимого устройства, как это видно из табличных значений, слишком мала для подавления грозových перенапряжений. Даже засыпка ферромагнитного порошка между лучами ЧЗУ, увеличивающая его погонное сопротивление вдвое, не даёт желаемых результатов. Длина ЧЗУ, способного защитить электрооборудования подстанции, должна будет составлять сотни метров. Поэтому от данного варианта формы ЧЗУ пришлось отказаться.

### **3.5 Компьютерное моделирование ЧЗУ в виде четырехугольной катушки и спирали**

Совпадение расчётных данных с результатами измерений сопротивления 28-лучевого макета при частотах вплоть до 1 МГц позволило проводить математическое моделирование для разных вариантов устройства без изготовления дорогостоящих макетов, к тому же требующих достаточно длительного времени для изготовления (время разработки и изготовления матрицы для получения необходимого профиля основания устройства составляет 2-3 месяца). Поэтому большая часть разработки элементов устройства проводилась с помощью компьютерного моделирования.

В течение нескольких месяцев были произведены расчеты более чем 20 различных форм устройства. Каждая форма требовала доработки программы с введением в неё новых функций. Один из вариантов формы устройства из рассмотренных представлен на рисунке 3.9.

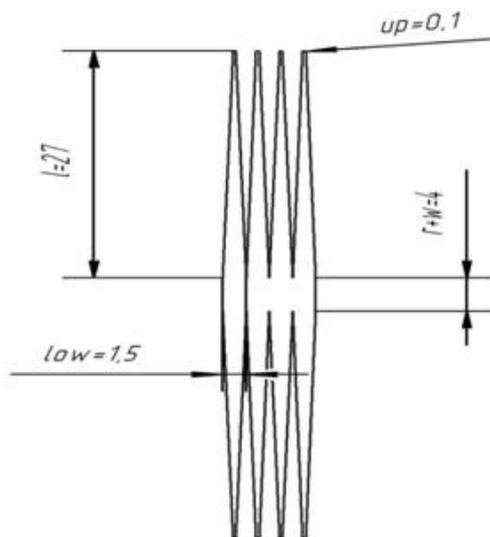


Рисунок 3.9 - Вариант формы плоского частотозависимого устройства

Плоская форма устройства с накладками из ленты 5БДСР толщиной 0,075 мм вдоль её лучей имеет активное сопротивление во много раз большее, чем активное сопротивление 28-лучевого устройства. Заметно увеличивается и её полное сопротивление. Результаты расчётов сопротивления плоского устройства приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Расчётные значения сопротивления плоского ЧЗУ при  $h=0.075$  без засыпки ферромагнитным порошком

F, кГц	R, Ом	X, Ом	Z, Ом
0,05	0.0004	0.005	0.005
10	0.14	0.28	0.31
300	1.76	2.9	3.4
1000	2.79	3.02	4.12

Погонное сопротивление плоского ЧЗУ имеет наиболее высокое значение из всех смоделированных вариантов форм устройства. Существенным недостатком данной формы является большая высота лучей, что будет конструктивно затруднять сборку частотозависимого устройства в целом и малая механическая прочность. Кроме этого, для того чтобы плоское ЧЗУ надежно обеспечивал защиту оборудования подстанции, оно должно иметь минимальное сопротивление порядка 200 Ом, то есть его длина будет около 100 метров. С учётом того, что обычно расстояние от последней опоры воздушной линии до

ввода подстанции составляет 20-30 метров, применения устройств такой длины затруднительно. Уменьшить общую длину ЧЗУ и одновременно увеличить его механическую прочность возможно только одним способом – изготовить его в виде катушки.

Одним из вариантов, позволяющим увеличить полное сопротивление ЧЗУ при одновременном уменьшении магнитной индукции, является выполнение пространственной конструкции ЧЗУ в виде четырехугольной катушки (рисунок 3.10а), состоящей из  $n$ -витков, каждый из которых выполнен из 4 элементов (модулей). При этом были сделаны попытки определить сопротивление модулей ЧЗУ различной формы. Один из вариантов поперечного сечения модуля имел вид, представленный на рисунке 3.10б.

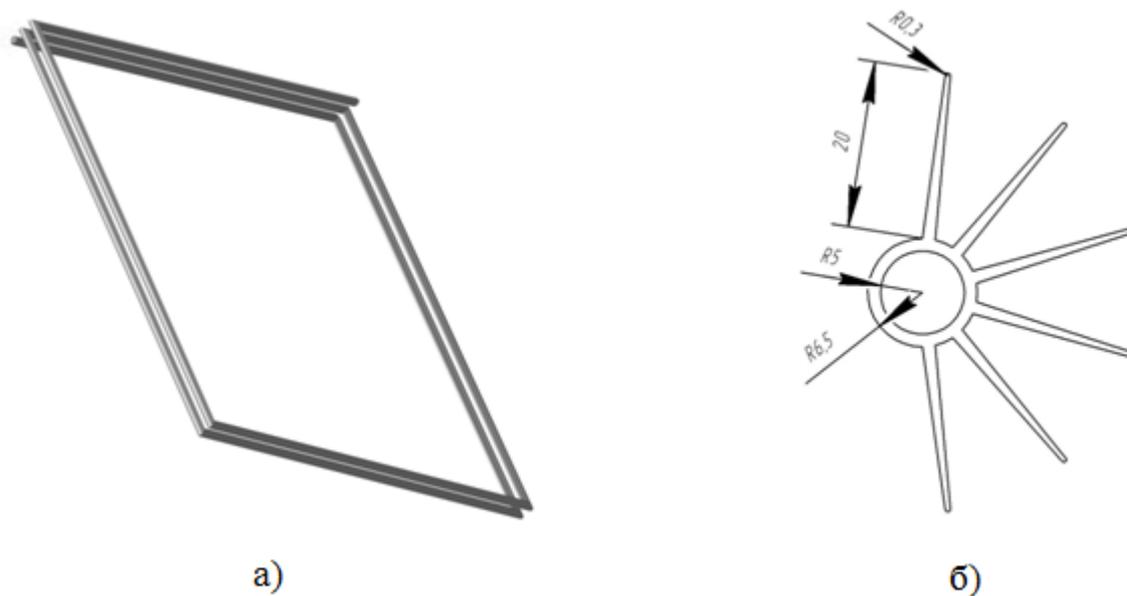


Рисунок 3.10 - Конструкция ЧЗУ в виде четырёхугольной катушки (а) и поперечное сечение полого цилиндрического модуля (б)

Как видно из расчётных значений сопротивления устройства данной формы, приведённых в таблице 3.5, устройство частотозависимого устройства в виде четырёхугольной катушки во много раз увеличивает его полное реактивное сопротивление.

Таблица 3.5 - Расчётные значения сопротивления плоского ЧЗУ в виде четырёхугольной катушки.

F, кГц	R, Ом	X, Ом	Z, Ом
0.05	$8.5e^{-5}$	0.00117	0.00117
10	0.017	0.19	0.19
300	0.269	4.719	4.72
1000	0.767	30.841	30.85

Но и в данной конструкции ЧЗУ основным недостатком так же является большая высота лучей и хрупкость конструкции в целом. Поэтому более выгодным и удобным вариантом исполнения ЧЗУ будет конструкция с наименьшей высотой лучей и с более толстым основанием, например, если сделать основание модуля устройства сплошным, а не полым, то можно уменьшить высоту луча (рисунок 3.11).

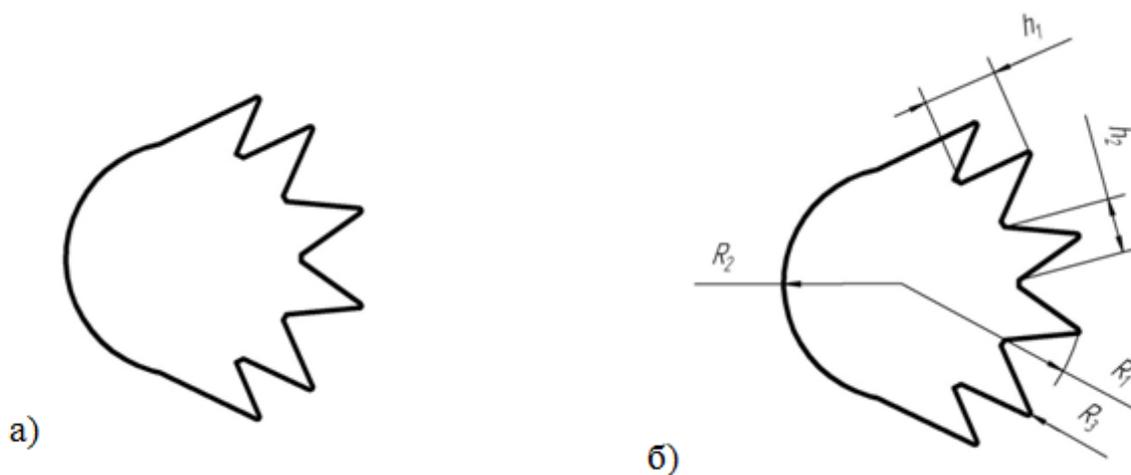


Рисунок 3.11 - Поперечное сечение сплошного модуля ЧЗУ (а) и его геометрические размеры (б)

Расчеты, приведённые в таблице 3.6 показывают, что наибольшие значения сопротивления в данном виде ЧЗУ можно получить, если его сечение будет иметь следующие размеры:

- площадь поперечного сечения будет составлять  $200 \text{ мм}^2$ ;
- $R_1 = 11 \text{ мм}$ ,  $R_2 = 7 \text{ мм}$ ,  $R_3 = 0,15 \text{ мм}$ ,  $h_1 = 4,4 \text{ мм}$ ,  $h_2 = 3,3 \text{ мм}$ .

Подчеркнем, что для достижения максимального сопротивления, лучи устройства должны быть ориентированы внутрь спирали.

Таблица 3.6 - Расчётные значения сопротивления сплошного ЧЗУ в виде четырёхугольной катушки

F, кГц	R, Ом	X, Ом	Z, Ом
0,05	$5.6e^{-5}$	0.0032	0.0032
10	0.0038	0.64	0.64
100	0.15	6.363	6.36
300	0.48	18.56	18.57
1000	0.97	61.17	61.17

Для дальнейшего моделирования за основу был принят следующий вариант конструкции ЧЗУ:

- резистор выполнен в виде квадратной катушки (квадратной трубы) с высотой  $H=2,5-3,0$  м и шириной  $L=0,6-0,65$  м (рисунок 3.12);

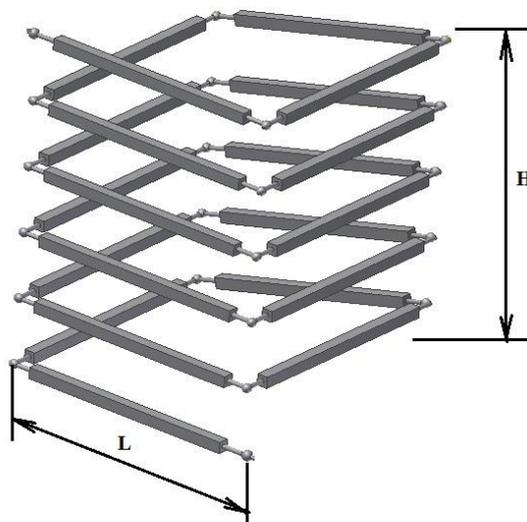


Рисунок 3.12 - Схема набора ЧЗУ из n-витков и m-модулей

- виток состоит из четырех модулей, каждый из которых имеет длину около 0,5 м;

- количество витков 100 (суммарная длина распределенного ЧЗУ 200 м);

- модули скрепляются между собой болтовым соединением с помощью специальных алюминиевых пластин (рисунок 3.13);

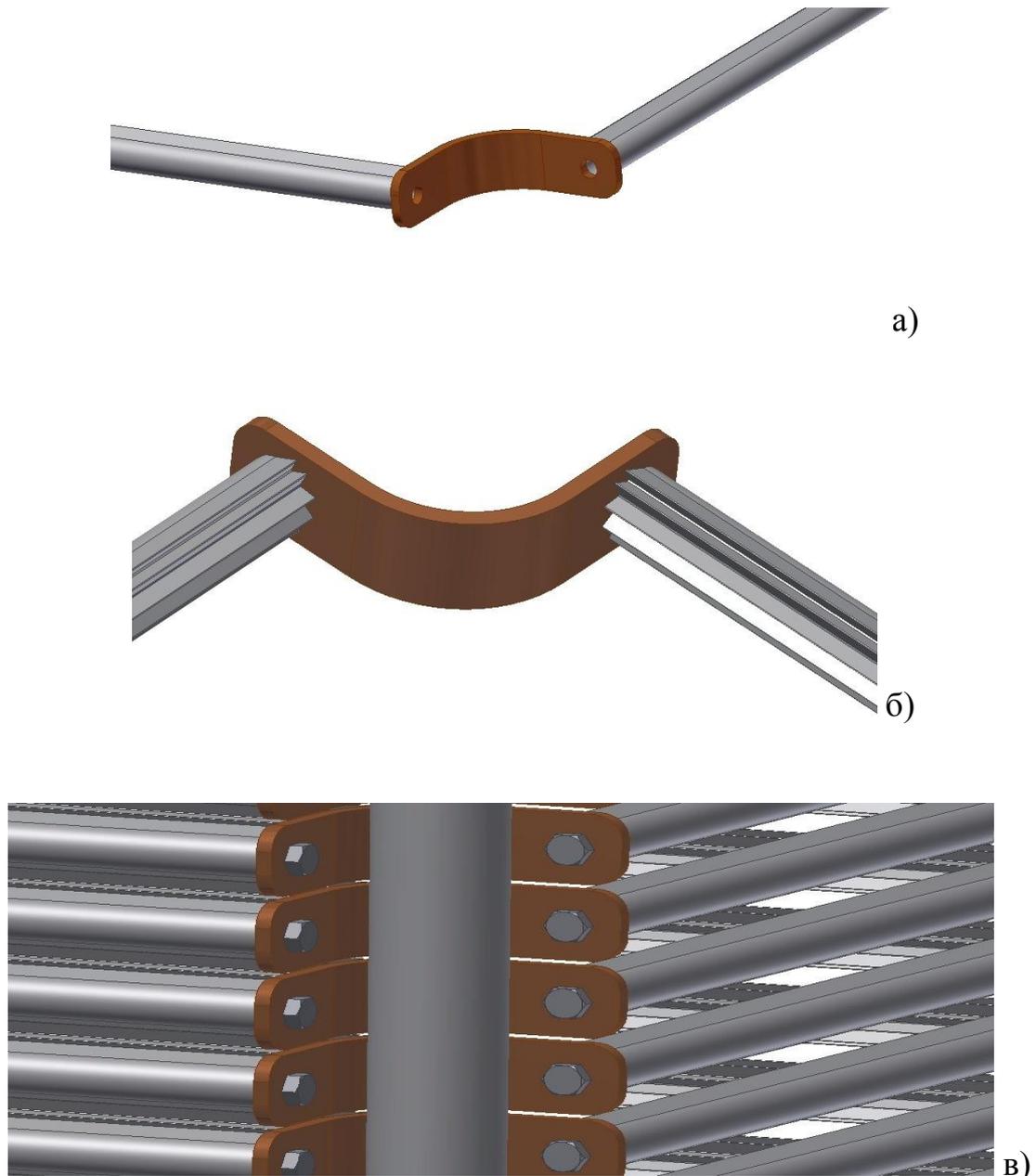
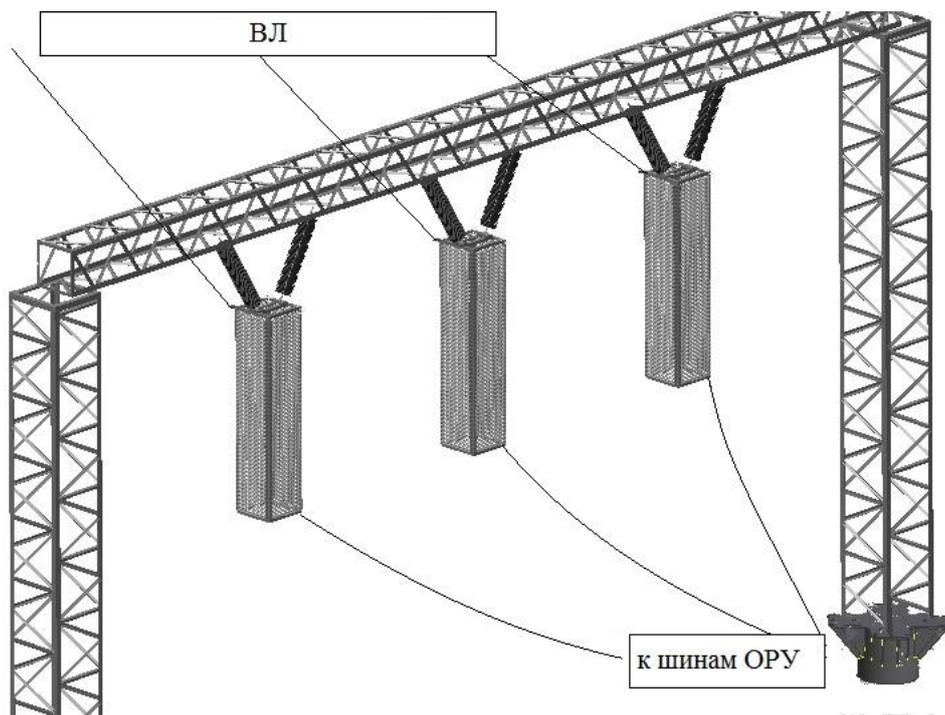


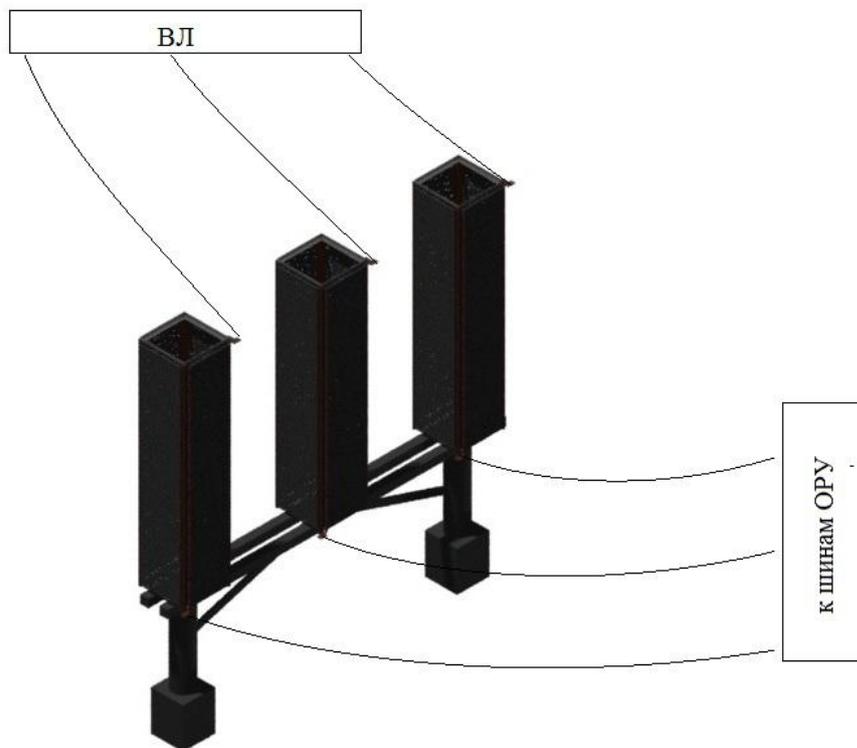
Рисунок 3.13 - Фрагмент конструкции ЧЗУ:  
 вид узла соединения модулей с внешней (а) и внутренней (б) стороны катушки;  
 в) – вид болтовых соединений модулей с внешней стороны катушки

- роль каркаса всей конструкции ЧЗУ выполняют 4 полимерных стержня, установленных по углам квадратной трубы, а сверху и внизу этой конструкции предусмотрены специальные узлы для крепления провода ВЛ и вводной ошиновки ОРУ;

- ЧЗУ может подвешиваться на входном портале ОРУ (рисунок 3.14,а) или устанавливаться на подставке с опорными изоляторами (рисунок 3.14,б).



а)



б)

Рисунок 3.14 - Расположение ЧЗУ на входном портале подстанции (а)  
или на подставке с опорными изоляторами (б)

Изменить величину сопротивления и магнитной индукции устройства данной сборки при прохождении через него электромагнитного импульса высокой частоты можно, например, варьируя толщиной накладки из ленты типа 5БДСР. Так в таблице 3.7 приведены результаты компьютерного моделирования сопротивления сплошного модуля устройства (рисунок 3.11) радиусом 4 мм и с высотой луча 5 мм в зависимости от толщины накладки из ленты 5БДСР на частоте 300 кГц.

Таблица 3.7 - **Зависимость погонного сопротивления сплошного ЧЗУ в зависимости от толщины накладки**

h , мм	R, Ом	X, Ом	Z, Ом
.025	0.15	17.76	17.76
0.05	0.21	17.74	17.74
0.075	0.29	17.69	17.69
0.1	0.36	17.6	17.6
0.15	0.43	17.39	17.4
0.175	0.43	17.29	17.3
0.2	0.42	17.21	17.21
0.25	0.38	17.07	17.07
0.3	0.33	16.97	16.97

Расчёты показывают, что активное сопротивление имеет свой пик при определённой толщине накладки. В данном случае максимальное активное сопротивление устройство будет иметь при накладке, состоящей из 7 слоёв общей толщиной 0,175 мм. На реактивное же сопротивление спирали в целом наибольшее влияние оказывают такие характеристики, как диаметр катушки и расстояние между рядами модулей.

Данная конструкция способна обеспечить подавление амплитуды грозового импульса, но при этом имеет ряд своих недостатков. Любая форма частотозависимого устройства, имеющая лучи, сложна для производства и сборки. Большое количество соединений неминуемо приводит к росту

сопротивления на рабочей частоте сети 50 Гц, а это в свою очередь приведет к потерям энергии и к перегреву самой конструкции. Кроме этого, поскольку рабочий ток протекает по всем этим контактам, то большое количество контактов снижает надёжность электроснабжения. Снизить сопротивление и увеличить механическую прочность контактов можно с помощью омеднения соединяемых деталей. Однако, технологические операции подготовки поверхностей и омеднения весьма затруднительны и дорогостоящи в виду общего развала общетехнологического производства. К тому же наличие острых углов в четырёхугольной конструкции способствует коронированию на рабочем напряжении, что является недопустимым. Поэтому очередной задачей стало разработать конструкцию без соединений между модулями ЧЗР и с особым вниманием к возможным местам локального усиления электрического поля.

Существенно облегчить задачу создания частотозависимого устройства позволяет использование для его основы обычного алюминиевого провода. В этом случае ЧЗУ будет иметь форму спирали, представленную на рисунке 3.15.

Сечение провода должно выбираться из значений номинальных токов подстанции 110 кВ. Например, для значения номинального тока 200 А вполне подходит алюминиевый провод А150 диаметром 15,8 мм.



Рисунок 3.15 - Общий вид ЧЗУ из круглого провода

Форма спирали позволяет избежать проблему множества контактов, так же как и проблему коронирования, поскольку провод не имеет острых поверхностей.

При этом значительно упрощается процесс намотки аморфной ленты 5БДСР на основание и сборка ЧЗУ в целом. Компьютерное моделирование показало, что сопротивление резистора определяется его геометрическими размерами и толщиной накладки в зависимости от исходных данных электрических параметров частотозависимого устройства. Простота конструкции и изготовления ЧЗУ, возможность менять его электрические параметры минимальными конструктивными изменениями позволило взять за основу разработки реального опытного образца частотозависимого устройства именно эту конструкцию.

### **3.6 Выводы по главе 3**

Расчёты, проведенные с помощью компьютерного моделирования, показали;

- создание частотозависимого устройства с необходимыми для подавления грозовых перенапряжений в сетях электрическими параметрами возможно;
- оптимальной формой частотозависимого устройства является спираль;
- реактивное сопротивление ЧЗУ всегда оказывается выше, чем активное сопротивление.

## Глава 4. Разработка опытного образца ЧЗУ для защиты подстанций ОАО «Тюменьэнерго»

В настоящем разделе работы приводятся результаты расчётов размеров опытного образца ЧЗУ и исследований эффективности его применения для снижения высокочастотной составляющей грозových перенапряжений, воздействующих на изоляцию электрооборудования подстанций высокого напряжения на примере ПС напряжением 110 кВ «Сугмутская», фрагмент территории, которой представлен на рисунке 4.1, а также ПС «Трудовая» и «Новогодняя».



Рисунок 4.1 - Подстанция «Сугмутская»

#### 4.1 Расчёт геометрических размеров ЧЗУ

Предварительные экспериментальные исследования показали, что на грозовой частоте ( $f=300$  кГц) погонные активное сопротивление ( $R^*$ ) и индуктивность ( $L^*$ ) ЧЗУ имеют следующую взаимосвязь и диапазон изменения:

$$R^* = (0,4 \dots 4,0) \text{ Ом/м, при этом } R^* \approx 0,5 \cdot X_L \approx 0,5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L^* . \quad (4.1)$$

Таким образом, в дальнейших расчетах были приняты следующие два возможных диапазона изменения погонных параметров ЧЗУ:

$$R^* = 0,4 \text{ Ом/м, } L^* = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м и } R^* = 4,0 \text{ Ом/м, } L^* = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м.} \quad (4.2)$$

Численные исследования с электрическими параметрами частотозависимого устройства, принятыми в (4.2) показали, что значения индуктивности для приемлемого сглаживания фронта волны грозových перенапряжений недостаточно. В этой связи была пересмотрена пространственная конструкция ЧЗУ в сторону увеличения индуктивной составляющей полного сопротивления ЧЗУ за счет выполнения конструкции в виде катушки. Поэтому на второй стадии численных исследований были приняты следующие параметры ЧЗУ (с суммарной длиной модулей не более 200 м):

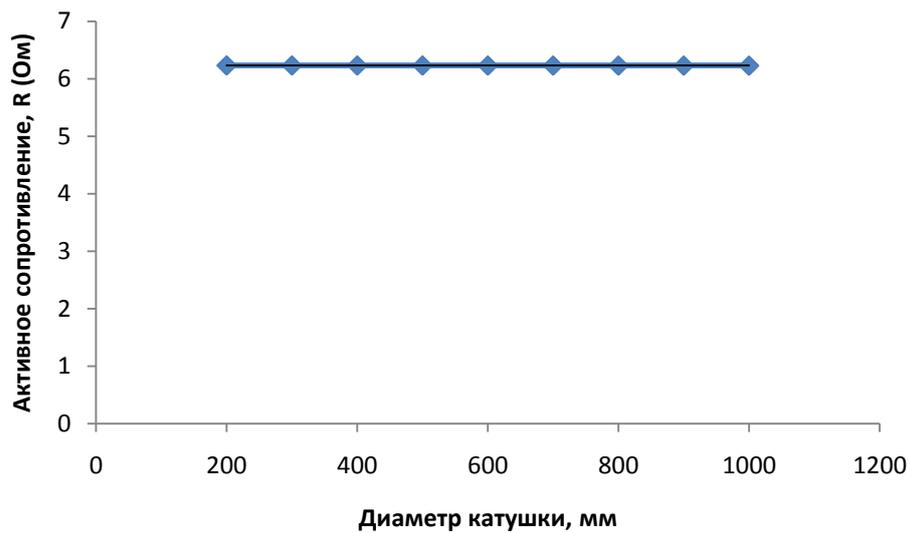
$$- R \approx (0,05 \dots 0,1) \omega L \approx 1,5 \text{ кОм при } L = (0,5 \dots 5,0) \text{ мГн.}$$

Зная необходимые электрические параметры ЧЗУ, можно рассчитать сопротивления устройства в виде спирали с помощью компьютерного моделирования. Расчётные значения погонного сопротивления ЧЗУ при частоте 300 кГц в зависимости от диаметра катушки представлены в таблице 4.1. Графики зависимости активного и полного сопротивления устройства показаны на рисунке 4.2.

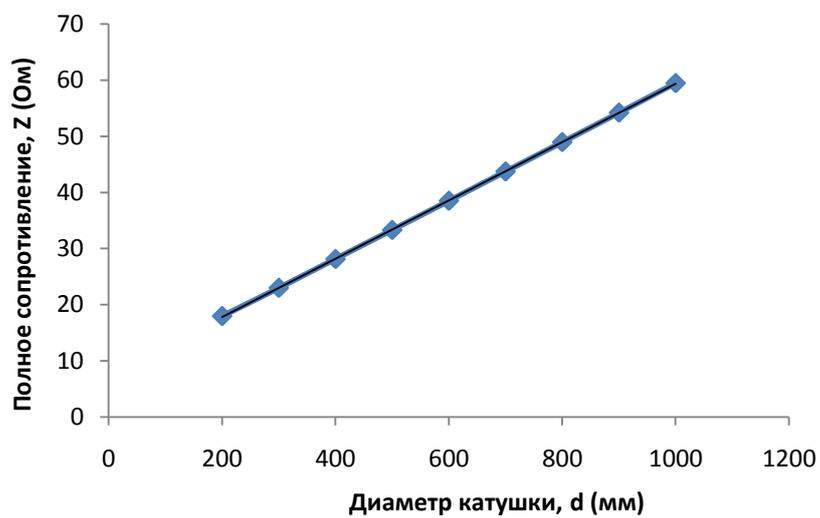
Таблица 4.1- Зависимость сопротивления ЧЗУ от диаметра катушки

D (мм)	R(Ом)	X(Ом)	Z(Ом)
200	6.23	16.29	17.45
300	6.23	21.36	22.25
400	6.23	26.42	27.14
500	6.23	31.48	32.09
600	6.23	36.54	37.07
700	6.23	41.6	42.07
800	6.22	46.67	47.08
900	6.22	51.73	52.1
1000	6.22	56.79	57.13

Из графиков видно, что величина полного сопротивления ЧЗУ зависит как от диаметра катушки, так и от расстояния между её витками. Активное сопротивление устройства при этом практически не изменяется. Также мало на активное сопротивление влияет и толщина накладки, график данной зависимости приведен на рисунке 4.4.



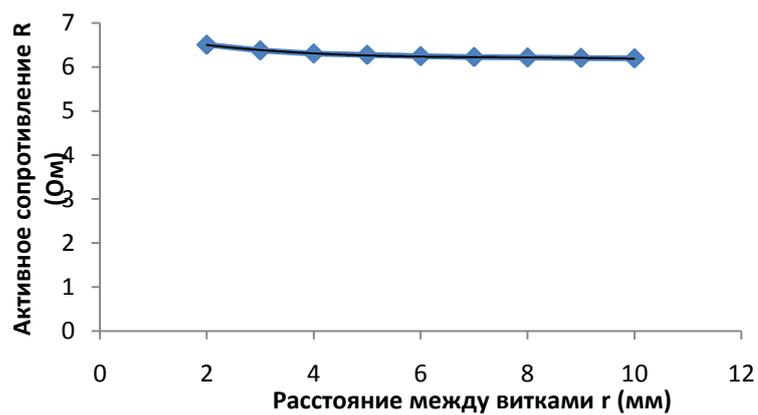
а)



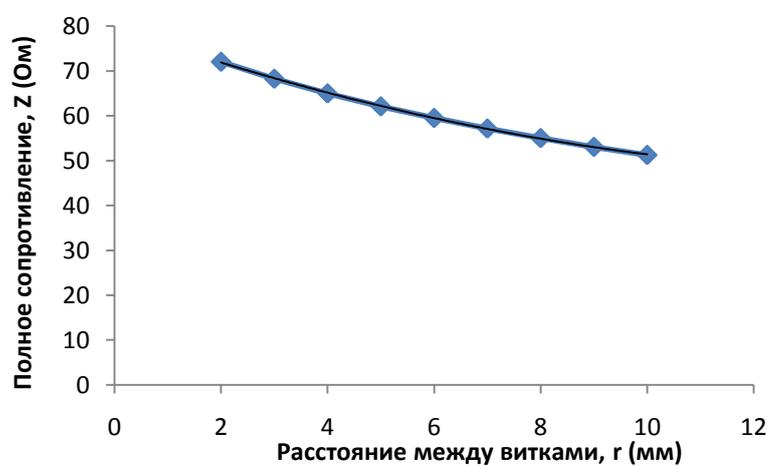
б)

Рисунок 4.2 - Зависимость активного (а) и полного (б) сопротивления ЧЗУ в виде спирали от её диаметра на частоте 300 кГц

По результатам моделирования также были построены графики зависимости сопротивления ЧЗУ от расстояния между витками обмотки (рисунок 4.3).



а)



б)

Рисунок 4.3 - Зависимость активного (а) и полного сопротивления (б) ЧЗУ в виде спирали от расстояния между витками на частоте 300 кГц.

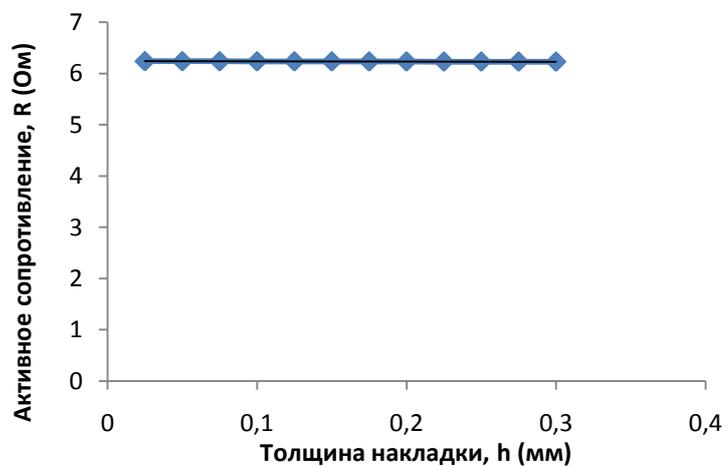


Рисунок 4.4 - Зависимость активного сопротивления ЧЗУ в виде спирали от толщины накладки

На величину активного сопротивления ЧЗУ влияют диаметр провода основания и магнитная проницаемость накладки из аморфной ленты 5БДСР. Так как диаметр провода выбирается исходя из допустимых токов защищаемой подстанции, то расчёт сопротивления проводился только в зависимости от  $\mu$  накладки. Результаты расчётов приведены в таблице 4.2 и представлены графиком на рисунке 4.5

Таблица 4.2 - Зависимость сопротивления ЧЗУ от магнитной проницаемости накладки

$\mu$	R(Ом)	X(Ом)	Z(Ом)
1000	1.07	51.5	51.51
10000	2.82	53.59	53.66
20000	3.93	54.71	54.85
30000	4.8	55.54	55.74
40000	5.55	56.21	56.49
50000	6.22	56.79	57.13

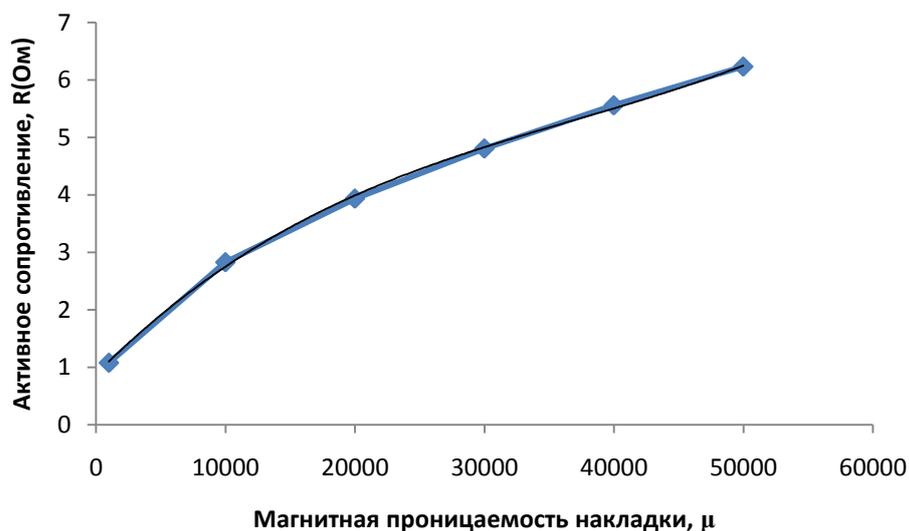


Рисунок 4.5 - Зависимость активного сопротивления ЧЗУ в виде спирали от магнитной проницаемости накладки

Сравнивая расчётные значения сопротивления сплошного ЧЗУ (рисунок 3.11 и 3.12) в виде четырехугольной катушки (таблица 3.6) с сопротивлением ЧЗУ на

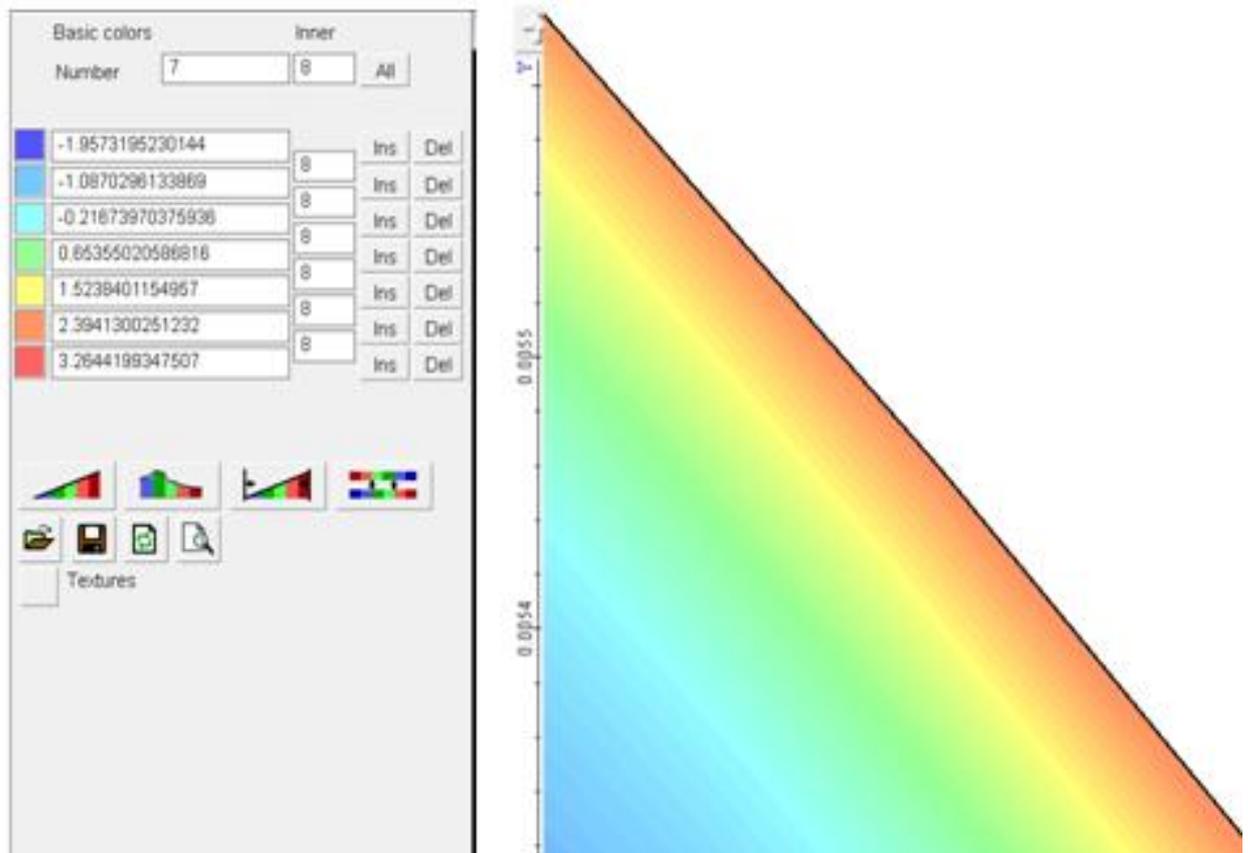
основе провода А150 в виде спирали, можно сделать вывод, что последние по своим параметрам намного превышает сплошное ЧЗУ. Изменяя размеры спирали, можно добиться показателей, необходимых для надёжной защиты оборудования от перенапряжений и создать наиболее простое в изготовлении и экономичное устройство. Используя показанные выше зависимости, были подобраны оптимальные размеры конструкции для подавления грозových перенапряжений. Диаметр спирали ЧЗУ должен составлять 1000 мм, расстояние между витками 7 мм, что обусловлено необходимостью наличия на частотозависимом устройстве двух слоёв изоляции общей толщиной 3,5 мм. Толщина наклейки из аморфной ленты 5БДСР должна быть выполнена в виде намотки на провод 12 слоев ленты общей толщиной 0,3 мм. Такая толщина позволит увеличить термическую стойкость ЧЗУ при прохождении импульса перенапряжения. Общая длина частотозависимого устройства должна быть не менее 120 м.

Значения погонного сопротивления частотозависимого устройства данной конструкции при магнитной проницаемости наклейки  $\mu = 50000$  на промышленной частоте и частоте грозового импульса по результатам компьютерного моделирования приведены в таблице 4.3.

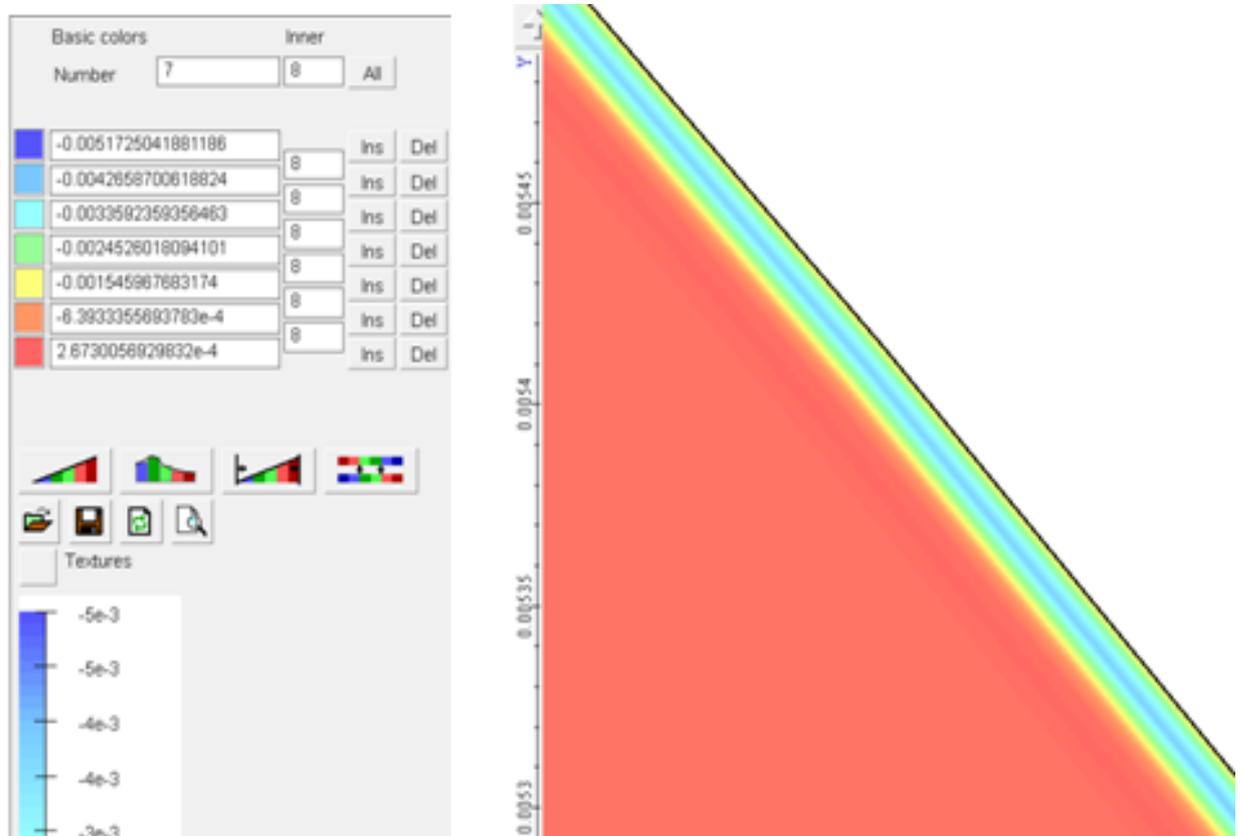
Таблица 4.3 - **Погонное сопротивление ЧЗУ в виде спирали**

F (кГц)	R (Ом)	X(Ом)	Z(Ом)
0,05	0.00015	0.01	0.01
300	6.22	56.79	57.13

Распределение электромагнитного поля по результатам компьютерного моделирования на частоте 50 Гц и 300 кГц в верхнем слое ЧЗУ показано на рисунке 4.6.



а)



б)

Рисунок 4.6 - Распределение электромагнитного поля в верхних слоях ЧЗУ  
а – при частоте 50 Гц; б – при частоте 300 кГц

Как видно из рисунка, при частоте входного сигнала 50 Гц магнитная индукция распределяется по сечению ЧЗУ практически равномерно, увеличиваясь от 1,087 в центре алюминиевого основания до 2,39 в ленте 5БДСР. При частоте сигнала 300 кГц рост магнитной индукции от центра ЧЗУ к ленте составляет от  $2,67 \cdot 10^{-4}$  Тл до 0,004 Тл соответственно.

В итоге по результатам компьютерного моделирования была разработана конструкция ЧЗУ, общий вид которой, приведен на рисунке 4.7б. Для сборки её основания требуется два кронштейна, сваренные из прямоугольной трубы (рисунок 4.7а) и 8 планок из текстолита, размером 40x30, соединяющие оба кронштейна.

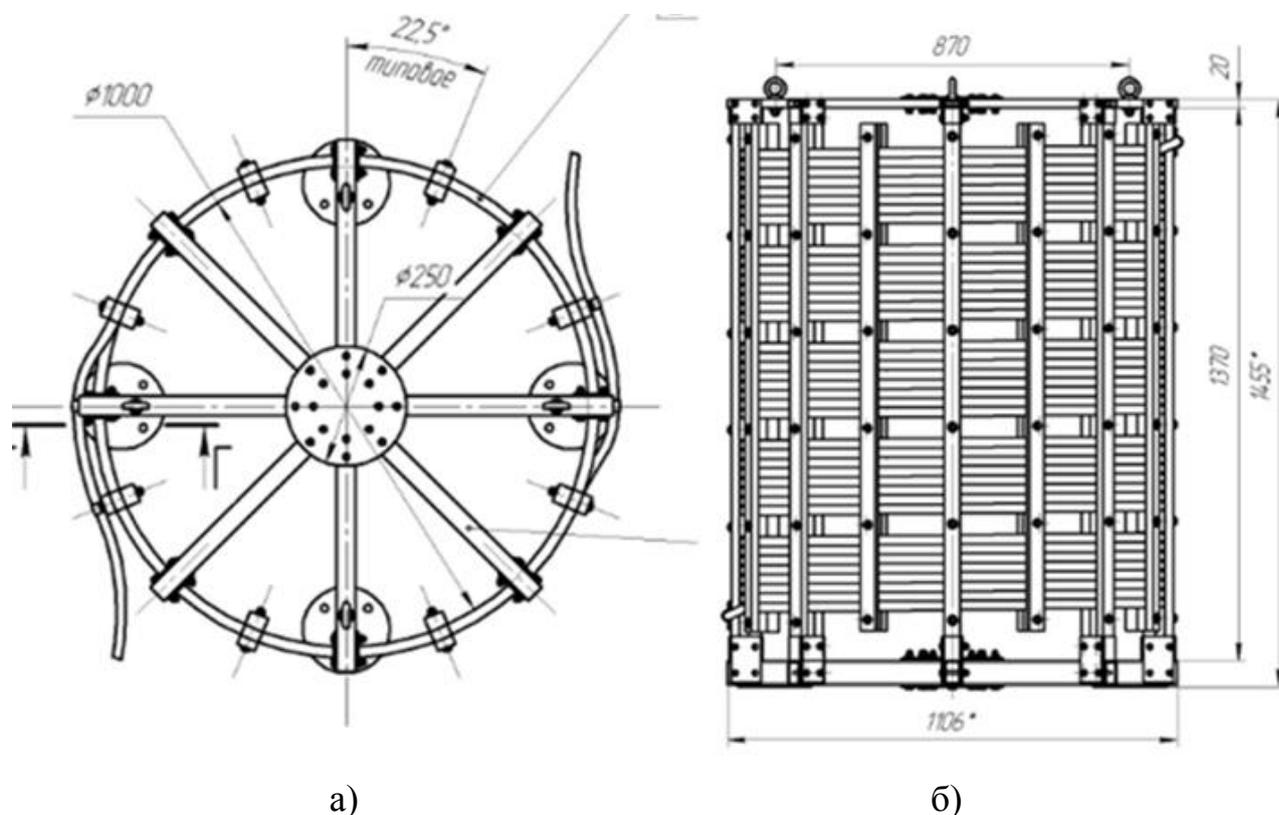


Рисунок 4.7 - Общий вид конструкции ЧЗУ

На это основание накладывался частотозависимый провод, изготовленный из двух частей: алюминиевого провода А-150 диаметром 15,8 мм и аморфной ленты 5БДСР толщиной 25 мкм. Лента плотно намотана по поверхности провода секциями шириной 50 мм, расстояние между секциями 3-4 мм. Каждая секция состоит из 12 слоев. Поверх ленты одеты два слоя термоусадочной трубки.

Первый слой трубка ТТУ 30/15 толщиной после усадки 1 мм с диапазоном рабочих температур от -55 до 105° и минимальной электрической прочностью 20 кВ/мм. Второй слой – термоусадочная трубка ТУТ, толщиной 1,5 мм с минимальной электрической прочностью 30 кВ/мм. Минимальное удельное электрическое сопротивление каждой трубки не менее  $10^{14}$  Ом·см. Общая длина ЧЗУ составляет 120 м. Провод укладывается на основание диаметром 1000 мм и высотой 1455 мм секциями по 8 витков с разрывами между секциями в 100 мм для снижения ветровой нагрузки. ЧЗУ крепится к основанию при помощи текстолитовых планок размером 40x20 с сопротивлением раскалыванию вдоль нитей в соответствии с [90] 204 кг/см.

#### 4.2 Расчет электродинамической стойкости ЧЗУ

При коротком замыкании в сети через ЧЗУ могут протекать токи в десятки раз превышающие номинальный ток. Так как эти токи создают электродинамические усилия (ЭДУ) стремящиеся деформировать как проводники токоведущих частей, так и изоляторы, на которых они крепятся, необходимо произвести расчёт электродинамической стойкости ЧЗУ.

Для этого при оценках будем считать ток равным току короткого замыкания (КЗ). При определении электродинамической стойкости используем значения токов однофазного  $I_{кз1}$  и двухфазного  $I_{кз2}$  токов короткого замыкания, которые по данным службы релейной защиты Ноябрьских сетей составляют  $I_{кз1} = I_{кз2} = 1700$  А

Однофазное короткое замыкание может привести к появлению сил, действующих на витки и стремящихся разорвать катушку. При этом возникают силы как в продольном  $F_{пр}$ , так и в поперечном  $F_{поп}$  направлениях. Продольная сила прикладывается к виткам и через их связи с каркасом к стойкам каркаса. Оценку проведем из следующих соображений:

Энергия магнитного поля зависит от индуктивности и тока:

$$W = L(h, r) I_{кз1}^2 / 2 \quad (4.3)$$

где  $h$ - длина катушки,  $r$  – её радиус.

Сила, действующая вдоль катушки  $F_{пр}$ , является производной от энергии по длине катушки. Её можно определить, используя известное выражение, определяющее индуктивность:

$$L(h,r)=D^2n^2 \quad (4.4)$$

где  $D$  – диаметр катушки,  $n$  – количество витков

Следовательно

$$F_{пр}= 5L(h,r) I_{кз1}^2/(4.5D+10h) \quad (4.5)$$

Используя фактические данные по индуктивности  $L(h,r)=(1-2)$  мГн, значения  $D = 1$  м,  $h = 1$  м получим, что продольная сила  $F_{пр}=(1\div 2)10^3$  Н .

Если эта сила прикладывается к продольным элементам каркаса катушки, то она просто эквивалентна увеличению веса катушки на 100 кг и практически не оказывает влияния на механическую прочность каркаса катушки.

Радиальная сила  $F_{поп}$  определяется дифференцированием по радиусу катушки  $D/2$ . Аналогично (4.5), радиальная сила равна:

$$F_{поп}= L(h,r) I_{кз1}^2(4.5D+20h)/((9D+20h)D) \quad (4.6)$$

Численные оценки данной формулы дают значение силы  $F_{пр}=(2\div 4)10^3$  Н . Эта сила прикладывается к всем виткам обмотки и действует в радиальном направлении. Если витки жестко фиксируются продольными планками, то эта сила прикладывается к внешним планкам, отрывая их от внутренних планок. Рассмотрим несколько случаев.

1. Внутренние планки жесткие и практически не сгибаются. Тогда к болтам, соединяющим внешние и внутренние планки, прикладывается сила (200÷400) кг. Если учесть, что количество планок составляет 8 и на каждой примерно 10 болтов, то на каждый болт придется менее 10 кг.

2. И внутренние и внешние планки достаточно гибкие. В этом случае они будут деформироваться, и поперечная сила будет компенсироваться только возникающим натяжением в алюминиевом проводнике. Её определение требует дополнительных математических преобразований. Сначала определим линейную плотность сил  $F_{л}$ , т.к. вся сила  $F_{пр}$  будет распределена на всю длину проводника  $\pi Dn$ . Затем проведем мысленный разрез каждого витка на две половины по

диаметру. Эти две половинки стягиваются именно силой натяжения в проводнике. Тогда, интегрируя проекцию  $F_{\perp}$ , перпендикулярную разрезу, можно определить, что натяжение  $N$  в проводе будет иметь вид

$$N = F_{\text{пр}} / \pi n \quad (4.7)$$

Подставив численные значения  $n=40$ , получим  $N = (20 \div 40)$  Н, что при площади сечения проводника  $150 \text{ мм}^2$  приведет к возникновению механического напряжения в алюминии  $(0.15 \div 0.3)$  МПа, что не вызовет заметной деформации провода.

При двухфазном КЗ возникают силы действия одних катушек на другие. Несложно показать, что они также невелики и не представляют опасности для целостности ЧЗУ и изоляторов.

### 4.3 Расчет термической устойчивости

При оценке термической устойчивости будем считать, что уход тепла за счет теплопроводности пренебрежимо мал. Протекание тока КЗ приведет к однородному нагреванию проводника. Для этого случая справедливо соотношение, описывающее рост температуры

$$c \cdot \rho \cdot dT/dt = j^2 / \sigma \quad (4.8)$$

где  $c=930$  Дж/(кг К)— удельная теплоемкость материала,  $\rho = 2.7 \text{ Т/м}^3$ — плотность,  $dT/dt$  - скорость нарастания температуры,  $j$  – плотность тока,  $\sigma = 36 \text{ МСм} \times \text{м}$ . Плотность тока определим делением тока КЗ на площадь сечения проводника  $S$ ,  $j = I_{\text{кз1}} / S$ .

Подставляя численные данные в выражение (4.8), можно получить, что скорость нарастания температуры элементов резистора при протекании тока КЗ составит примерно

$$dT/dt \approx 8 \text{ К/сек} \quad (4.9)$$

Поскольку ток КЗ может протекать только кратковременно, после чего происходит отключение, ясно, что элементы ЧЗУ нагреваются незначительно.

По результатам компьютерного моделирования электрических параметров ЧЗУ и расчётов прочности конструкции были смонтированы три опытных образца ЧЗУ, отличающихся друг от друга количеством секций провода на основании. Общий вид образцов представлен на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 - Общий вид опытных образцов ЧЗУ

#### 4.4 Расчёт экономического эффекта ЧЗУ

Оценка экономического эффекта базируется на сопоставлении затрат на ЧЗУ и стоимости предотвращенных возможных потерь.

Себестоимость ЧЗР складывается из стоимости материалов, стоимости работы и может быть оценена следующим образом. Изготовление трех опытных образцов потребовало следующих затрат на материалы:

- |                |             |
|----------------|-------------|
| 1. Провод А150 | 27 292 руб. |
| 2. Лента 5БДСР | 72 688 руб. |

3. Текстолит	56 463 руб.
4. Изоляция тонкая	9 500 руб.
5. Изоляция основная	23714 руб.
6. Металл	3 106 руб.
7. Крепёж	5 421 руб.
8. Клей	2 216 руб.
9. Скотч	1 300 руб.
Итого	202 700 руб.

Стоимость работ по изготовлению трех образцов не превышала 30000 руб. Отсюда себестоимость изготовления одного образца составляла не более 78000 руб. При не разовом производстве позиции 2, 3, 5, 7 будут существенно удешевлены. По нашим оценкам возможно уменьшение себестоимости примерно в 1.5 раза, соответственно себестоимость составит примерно 50 т.р., а цена реализации – примерно 70-80 т.р. При оптовой поставке возможно снижение на 10-20%. В зависимости от схемы защищаемой подстанции будет варьироваться конструкция, что даст возможность снижения цены в некоторых случаях на 20-30%.

С другой стороны, затраты на восстановление трансформатора после аварии представляются следующими: полная замена трансформатора примерно оценивается в 10 млн. руб. Ремонт трансформатора, в зависимости от сложности, по данным интернет-площадки В2-В Энерго, составляет от 1.1 млн. руб. до 5 млн. руб.

Ясно, что сопоставление возможного ущерба и стоимости ЧЗУ делает экономический эффект достаточно значительным за счет снижения аварийности силовых трансформаторов. Очевидно, что стоимость резисторов (на три фазы) составляет не более 5% от стоимости защищаемого оборудования.

## 4.5 Исследование эффективности применения ЧЗУ для снижения высокочастотной составляющей грозовых перенапряжений

Для анализа эффективности ЧЗУ данной конструкции по деформации крутизны набегающего с воздушной линии на подстанцию импульса грозового перенапряжения была использована расчётная схема в которой на ВЛ длиной 12 км посередине в рассечку включено ЧЗУ, представленная на рисунке 4.9[92, 93].

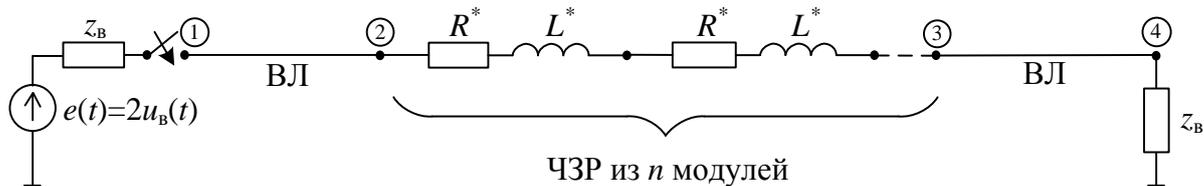


Рисунок 4.9 - Расчетная схема для анализа эффективности ЧЗУ по деформации крутизны импульса напряжения

В реальных условиях при грозовом поражении ВЛ импульс напряжения при набегаании на ПС деформируется – уменьшается его амплитуда и увеличивается фронт за счет импульсной короны, а также потерь в земле и проводе. Для получения качественной картины непосредственного влияния ЧЗР на увеличение фронта набегающей с ВЛ волны напряжения на первом этапе исследования во внимание не принимались отмеченные выше демпфирующие факторы. Это позволило получить не заниженные результаты исследования, а более четкую картину эффективности ЧЗУ.

При анализе также учитывалось, что даже при применении на подходе к ПС защитного подхода длиной 1,5-2,0 км имеется вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту в непосредственной близости от шин ОРУ, а наличие грозотроса на подходе к ПС увеличивает число прямых ударов молнии в ВЛ, а следовательно увеличивается число набегающих на ПС волн с крутыми фронтами за счет обратных перекрытий с тела опоры на провод. Вольт-секундные характеристики воздушных линий напряжением 110 кВ, принятые в расчетах, приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Вольт-секундные характеристики воздушных линий 110 и 220 кВ

$t$ , мкс	1	2	3	4	5	10
$U_{\text{ВСХ}}(t)$ , кВ	1310	1050	948	892	857	782
$U_{\text{ВСХ}}(t)$ , кВ	2245	1800	1624	1528	1468	1342

На рисунках 4.10, 4.11 и 4.12, соответственно приведены компьютерные осциллограммы при прохождении полной волны напряжения (с амплитудой 1,0 и формой 1,2/50 мкс), а также срезанной и короткой волн напряжения через ЧЗУ.

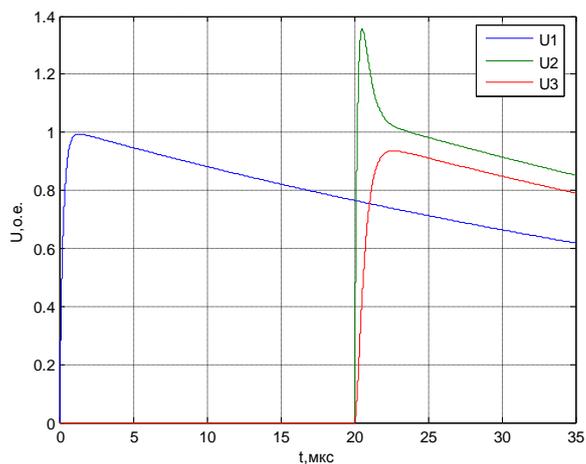
При этом:

- на рисунках а) приведены формы напряжения в различных точках расчетной схемы 4.9;

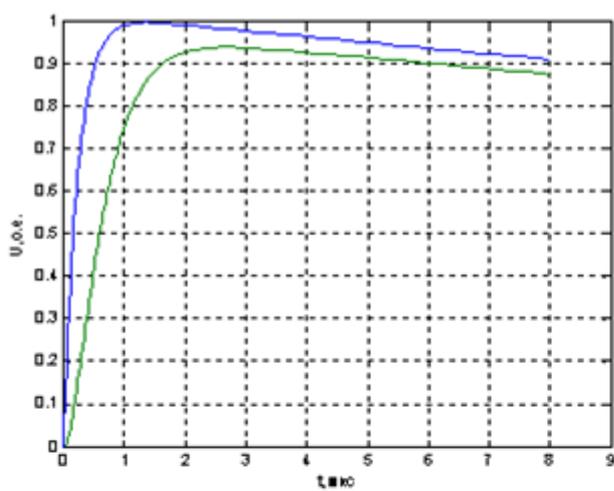
- на рисунках б), в), г), д) приведены воздействующий импульс напряжения и его форма после прохождения через ЧЗУ при варьировании его параметров, отвечающих таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Электрические параметры ЧЗУ, принятые в расчётах.

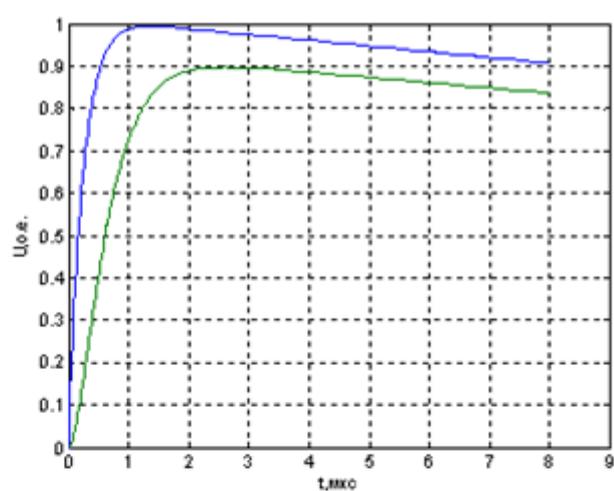
Номер варианта	$L$ , мГн	$R$ , Ом
1 (Рисунок 44,45,46, б)	0,5	47,1
2 (Рисунок 44,45,46, в)	0,5	94,2
3 (Рисунок 44,45,46, г)	2,5	235,5
4 (Рисунок 44,45,46, д)	2,5	471,0



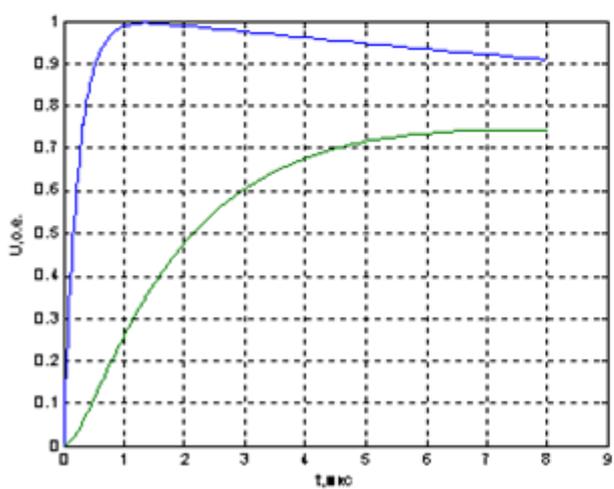
а)



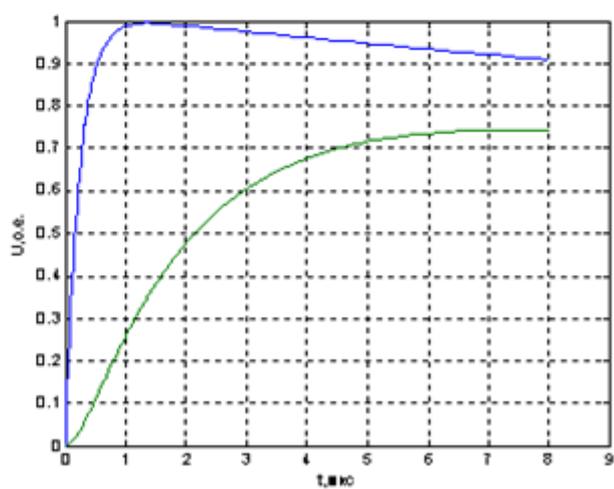
б)



в)



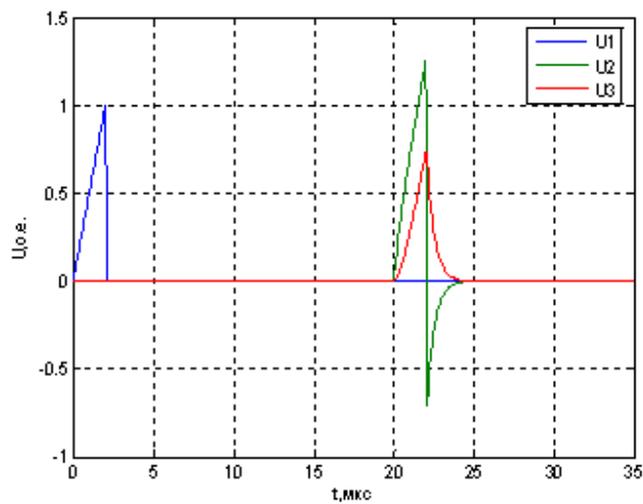
г)



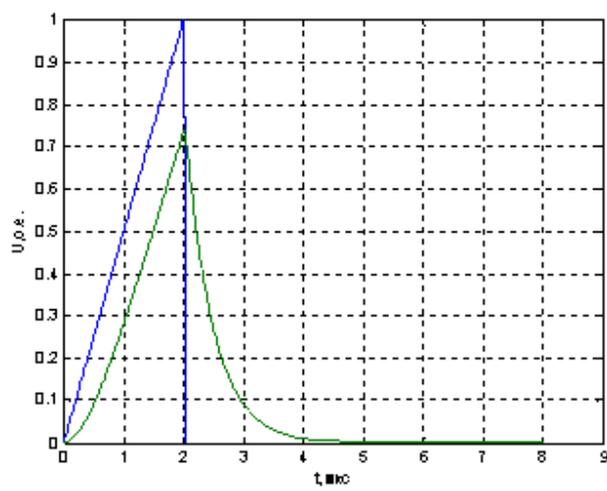
д)

Рисунок 4.10 - Влияние ЧЗУ на искажение крутизны, набегающей с ВЛ полной волны напряжения

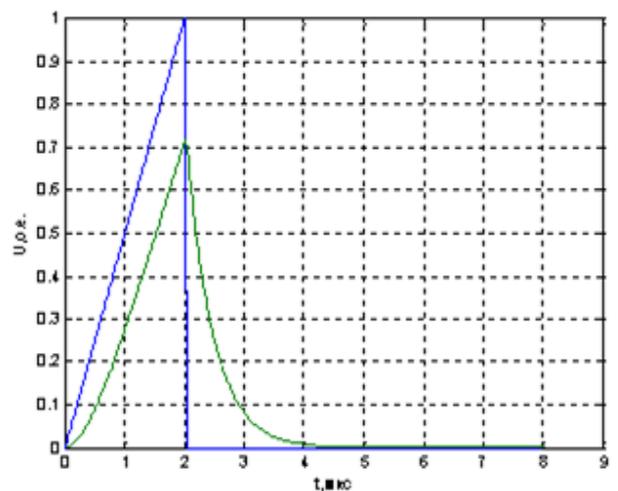
а) осциллограммы в точках 1,2,3 расчётной схемы; б) осциллограммы в точках 1,3 при  $L=0.5 \text{ мГн}$  и  $R=47.1 \text{ Ом}$ ; в) осциллограммы в точках 1,3 при  $L=0.5 \text{ мГн}$  и  $R=94.2 \text{ Ом}$ ; г) осциллограммы в точках 1,3 при  $L=2.5 \text{ мГн}$  и  $R=235.5 \text{ Ом}$ ; д) осциллограммы в точках 1,3 при  $L=2.5 \text{ мГн}$  и  $R=471 \text{ Ом}$



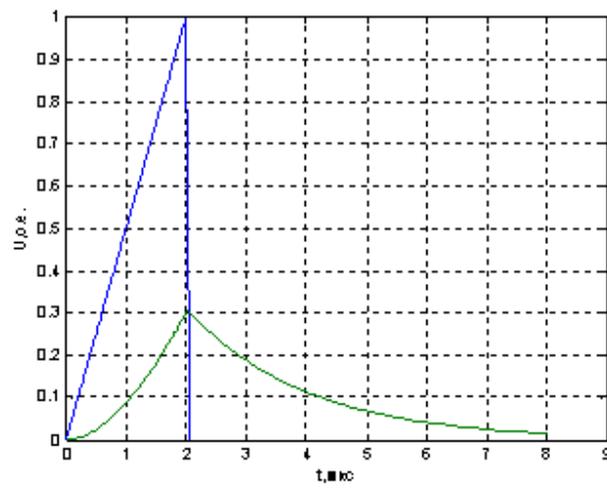
а)



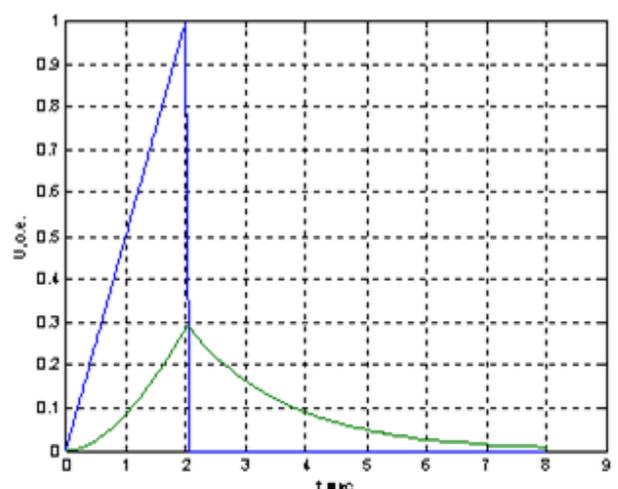
б)



в)

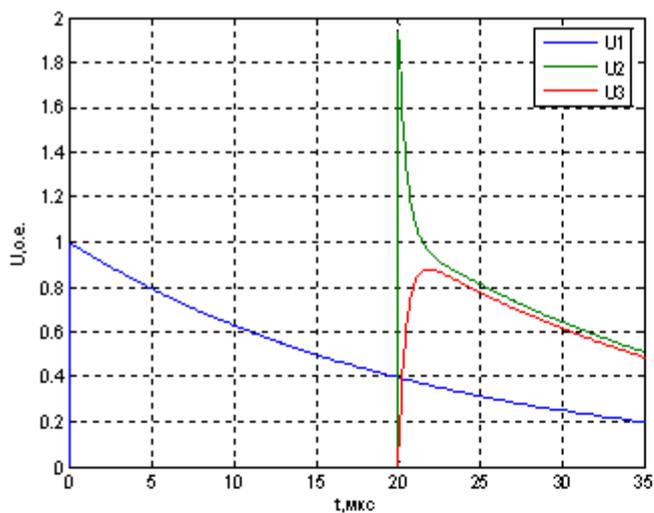


г)

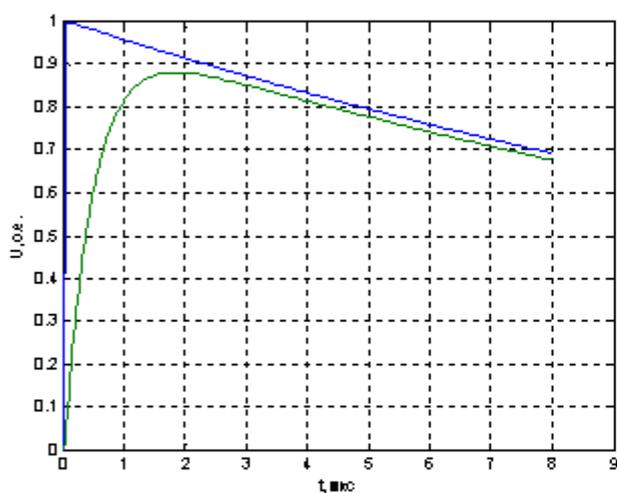


д)

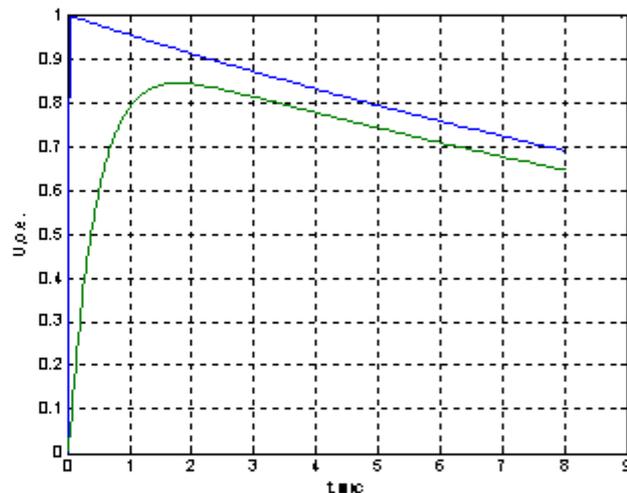
Рисунок 4.11 - Влияние ЧЗУ на искажение крутизны, набегающих с ВЛ срезанных волн напряжения: а) осциллограммы в точках 1,2,3 расчётной схемы; б) осциллограммы в точках 1,3 при  $L = 0,5$  мГн и  $R = 47,1$  Ом; в) осциллограммы в точках 1,3 при  $L = 0,5$  мГн и  $R = 94,2$  Ом; г) осциллограммы в точках 1,3 при  $L = 2,5$  мГн и  $R = 235,5$  Ом; д) осциллограммы в точках 1,3 при  $L = 2,5$  мГн и  $R = 471$  Ом



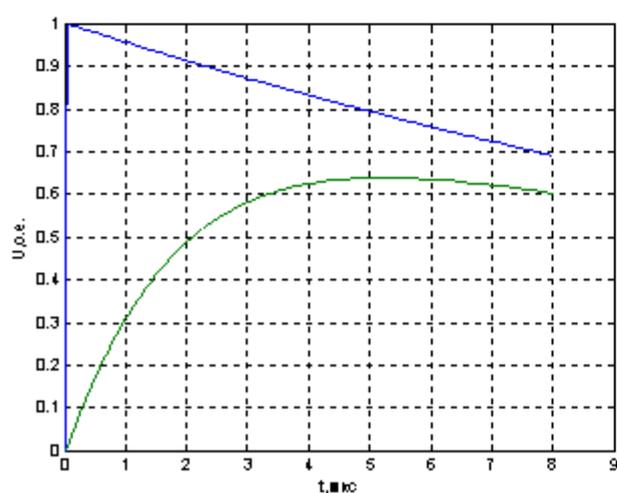
а)



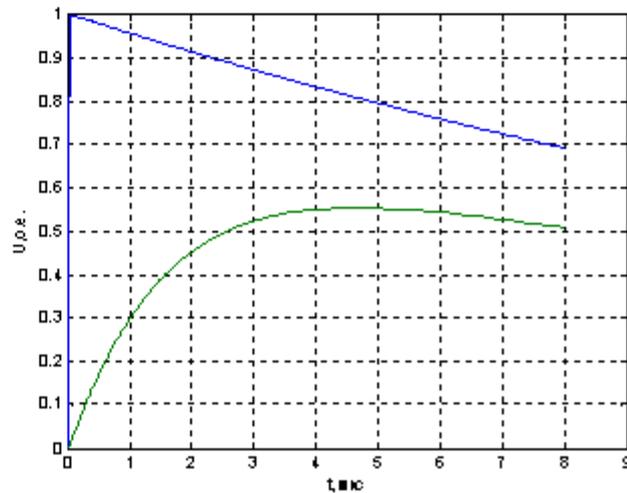
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.12 - Влияние ЧЗУ на искажение крутизны, набегающих с ВЛ коротких волн напряжения: а) осциллограммы в точках 1,2,3 расчётной схемы; б) осциллограммы в точках 1,3 при  $L = 0,5$  мГн и  $R = 47,1$  Ом; в) осциллограммы в точках 1,3 при  $L = 0,5$  мГн и  $R = 94,2$  Ом; г) осциллограммы в точках 1,3 при  $L = 2,5$  мГн и  $R = 235,5$  Ом; д) осциллограммы в точках 1,3 при  $L = 2,5$  мГн и  $R = 471$  Ом

Из приведенных данных видно, что ЧЗУ значительно увеличивает длительность фронта импульса перенапряжения, снижая тем самым опасность градиентных перенапряжений. Кроме этого также наблюдается снижение амплитуды входного импульса после прохождения ЧЗУ. В целом ЧЗУ начинает эффективно «работать» при значениях индуктивности около и свыше 2,5 мГн.

Для сравнения оценим эффективность демпфирования высокочастотных перенапряжений при установке на линии по ходу набегания импульса напряжения трех аппаратных устройств - ЧЗУ, силового реактора и конденсатора связи. Очевидно, что эффект по снижению крутизны набегающего с ВЛ импульса напряжения будет зависеть от величины активно-индуктивных параметров ЧЗУ и силового реактора, а также емкости конденсатора связи.

Анализ влияния собственно ЧЗУ и силового реактора на крутизну набегающего с ВЛ импульса напряжения также проводился по расчетной схеме представленной на рисунках 4.9 и 4.13(а). Для оценки влияния конденсатора связи использовалась схема, приведенная на рисунке 4.13 (б). Еще раз отметим, что в рассматриваемых расчетных схемах не учитывается эффект снижения крутизны импульса напряжения за счет зарядки суммарной емкости оборудования ПС, импульсной короны, потерь в проводе и земле.

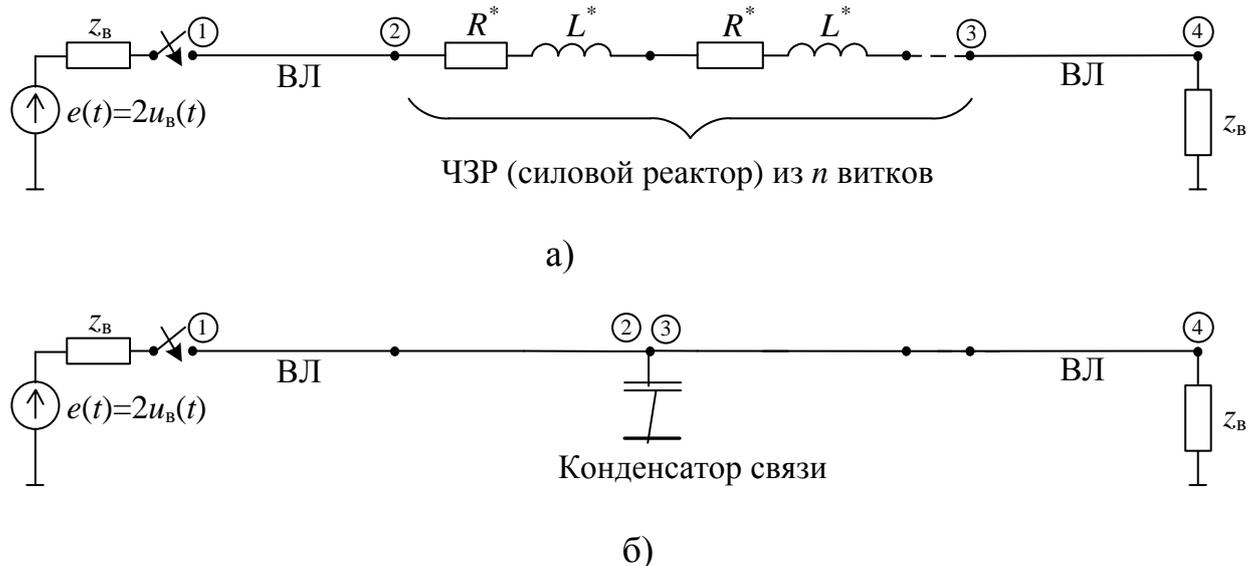
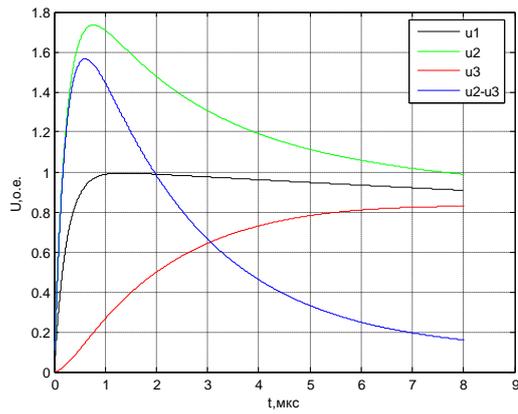


Рисунок 4.13 - Расчетные схемы для анализа эффективности ЧЗУ и силового ректора (а), а также конденсатора связи (б) на деформацию крутизны импульса напряжения

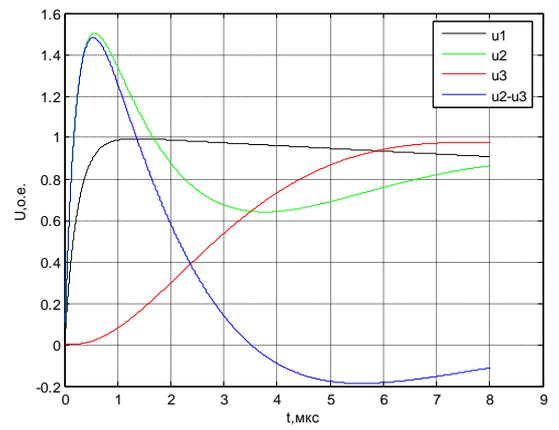
На рисунках 4.14, 4.15 и 4.16 приведены компьютерные осциллограммы изменения напряжения в различных точках расчетных схем (рисунок 4.13) при прохождении полной волны напряжения (с амплитудой 1,0 и формой 1,2/50 мкс), а также срезанной (2/0 мкс) и короткой (0,1/15 мкс) волн через ЧЗУ, силовой реактор ВЧ-заградителя, конденсатор связи и при совместном применении силового реактора и конденсатора связи.

В названиях на рисунках 4.14-4.17 приняты следующие обозначения:

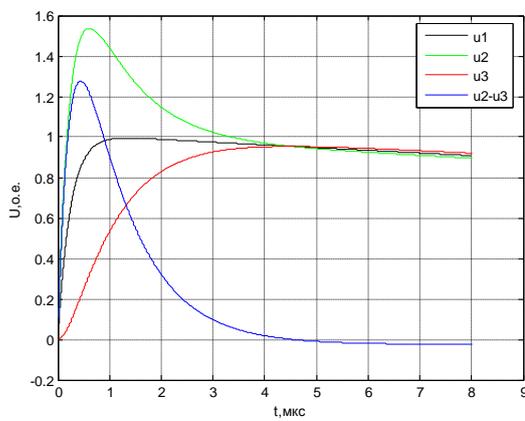
- $U_i$  – напряжение в  $i$ -ой точке расчетной схемы рисунка 4.13;
- $U_2-U_3$  – падение напряжения на катушке силового реактора;
- ЧЗУ – частотно-зависимое устройство;
- СР – силовой реактор ВЧ-заградителя;
- КС – конденсатор связи;
- СР+КС – совместное применение силового реактора и конденсатора связи.



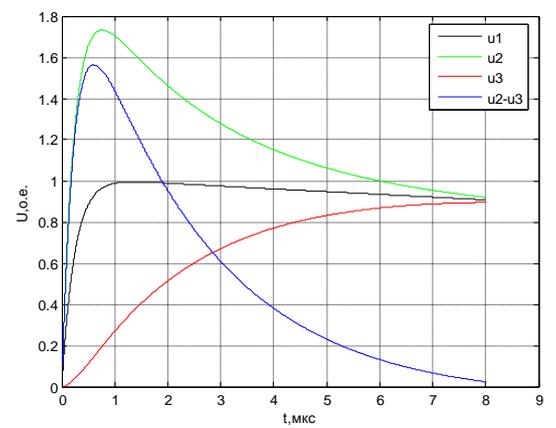
а)



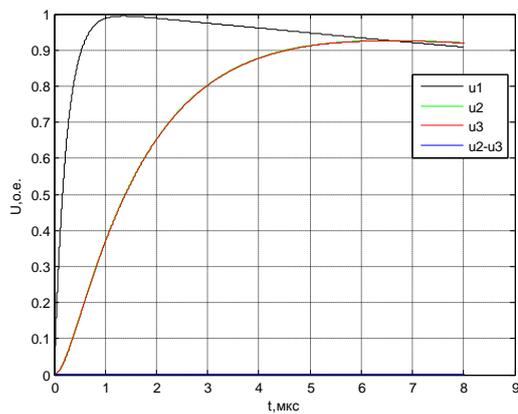
б)



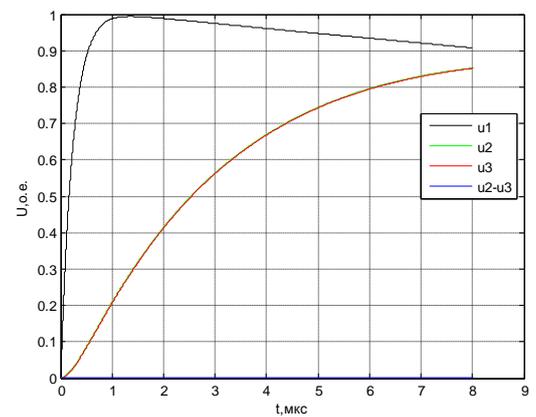
в)



г)



д)



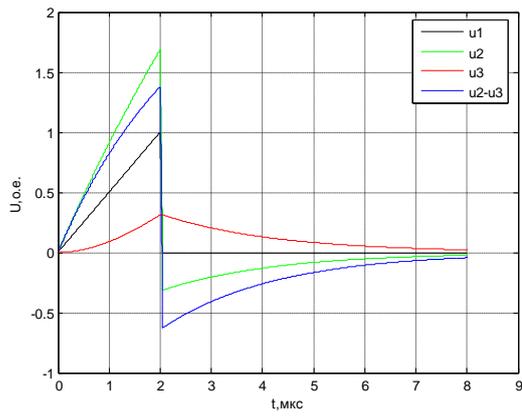
е)

Рисунок 4.14 - К анализу эффективности ЧЗУ (а), СР совместно с КС (б), СР (в, г) и КС (д, е) по снижению крутизны, набегающей с ВЛ полной волны напряжения:

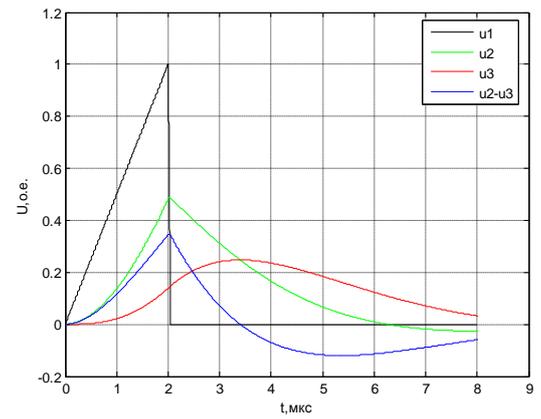
а –  $R = 96,4 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,5 \text{ мГн}$ ; б –  $R = 0,57 \text{ Ом}$ ,  $L = 1,0 \text{ мГн}$ ,  $C = 6,4 \text{ нФ}$ ;

в –  $R = 0,57 \text{ Ом}$ ,  $L = 1,0 \text{ мГн}$ ; г –  $R = 1,14 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,0 \text{ мГн}$ ; д –  $C = 6,4 \text{ нФ}$ ;

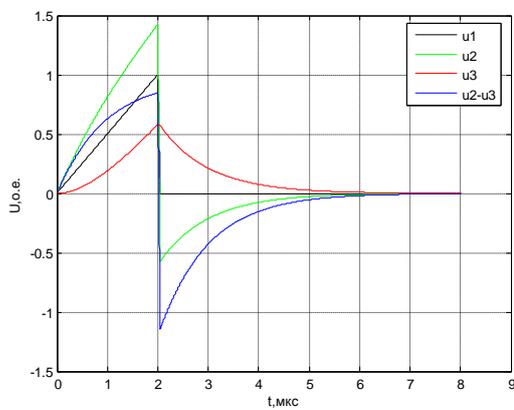
е –  $C = 12,8 \text{ нФ}$



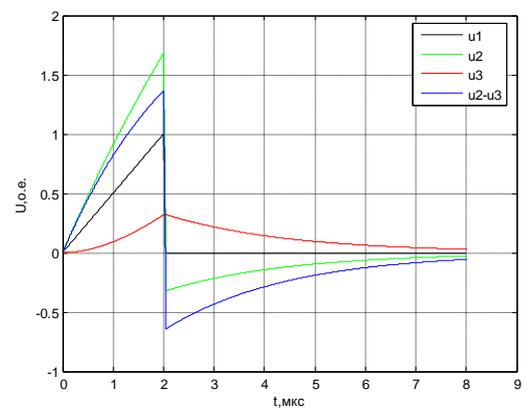
а)



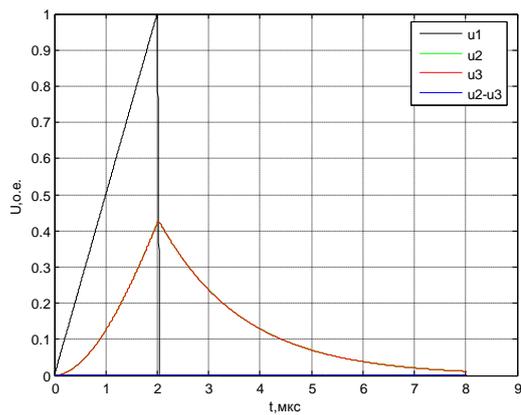
б)



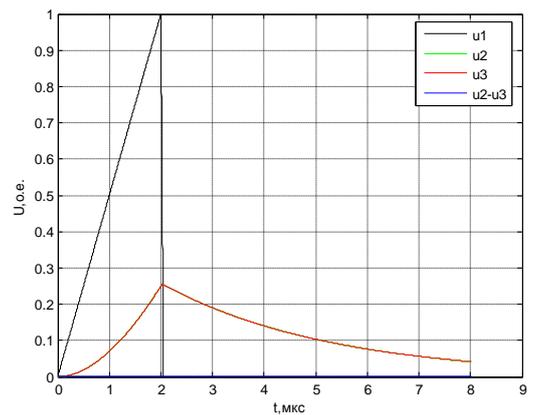
в)



г)



д)

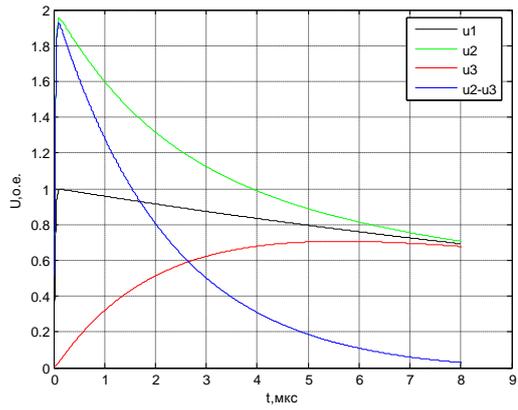


е)

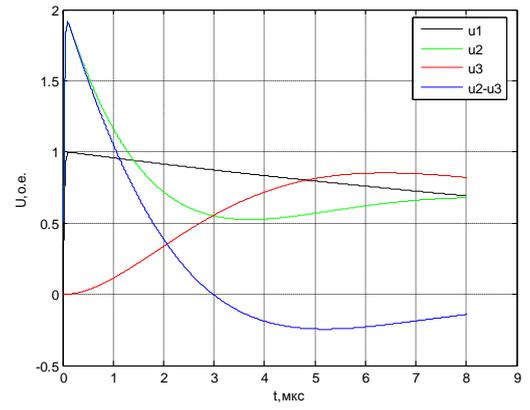
Рисунок 4.15 - К анализу эффективности ЧЗУ (а), СР совместно с КС (б), СР (в, г) и КС (д, е) по снижению крутизны, набегающей с ВЛ срезанной волны напряжения:

а –  $R = 96,4 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,5 \text{ мГн}$ ; б –  $R = 0,57 \text{ Ом}$ ,  $L = 1,0 \text{ мГн}$ ,  $C = 6,4 \text{ нФ}$ ;

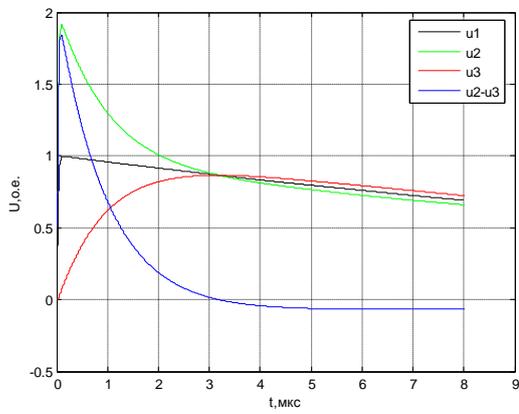
в –  $R = 0,57 \text{ Ом}$ ,  $L = 1,0 \text{ мГн}$ ; г –  $R = 1,14 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,0 \text{ мГн}$ ; д –  $C = 6,4 \text{ нФ}$ ; е –  $C = 12,8 \text{ нФ}$



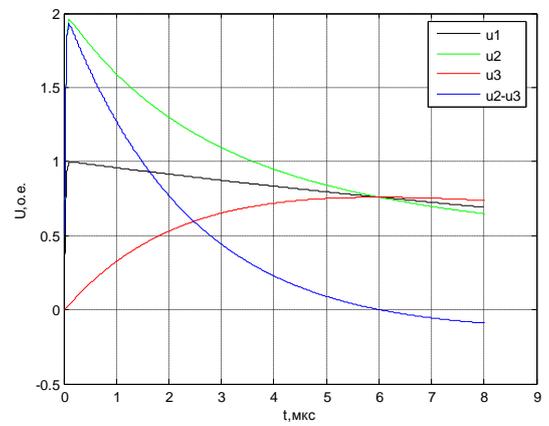
а)



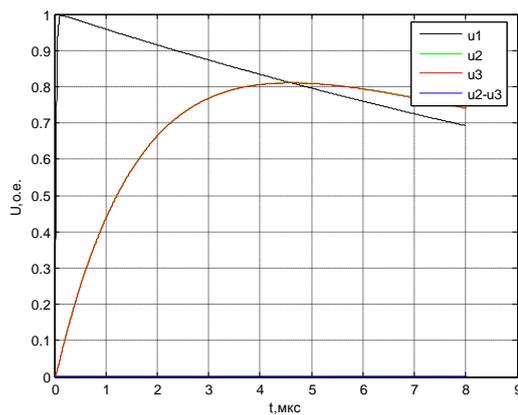
б)



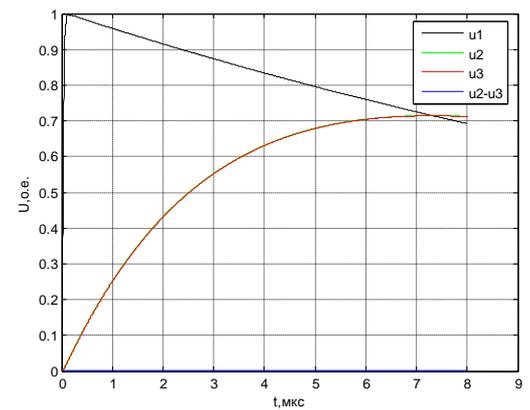
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4.16 - К анализу эффективности ЧЗУ (а), СР совместно с КС (б), СР (в, г) и КС (д, е) по снижению крутизны, набегающей с ВЛ короткой волны напряжения:  
 а –  $R = 96,4 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,5 \text{ мГн}$ ; б –  $R = 0,57 \text{ Ом}$ ,  $L = 1,0 \text{ мГн}$ ,  $C = 6,4 \text{ нФ}$ ;  
 в –  $R = 0,57 \text{ Ом}$ ,  $L = 1,0 \text{ мГн}$ ; г –  $R = 1,14 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,0 \text{ мГн}$ ; д –  $C = 6,4 \text{ нФ}$ ;  
 е –  $C = 12,8 \text{ нФ}$

На рисунке 4.17 показаны расчетные кривые для проведения сравнительного анализа эффективности различных аппаратных устройств по демпфированию крутизны набегающего с ВЛ импульса напряжения.

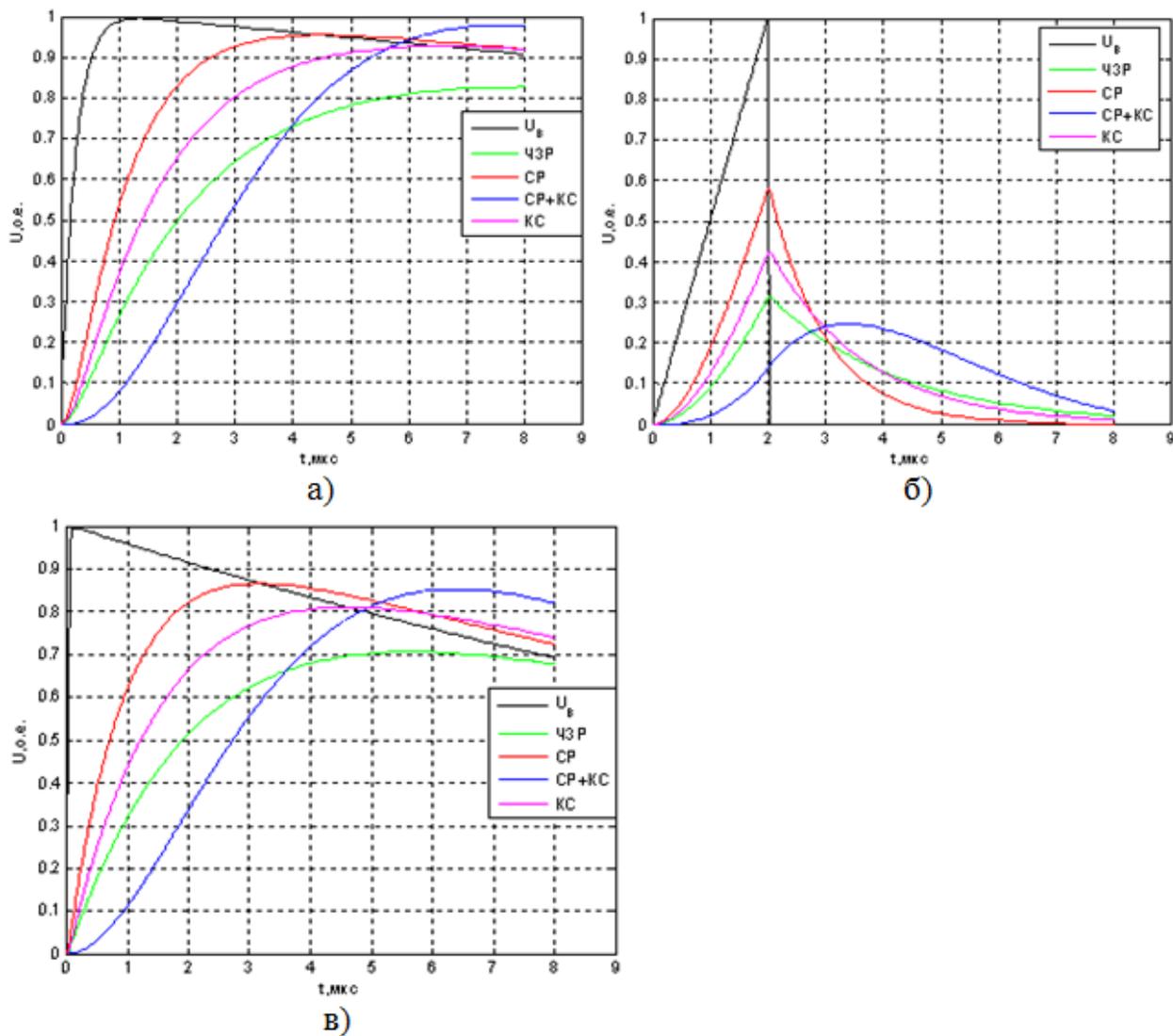
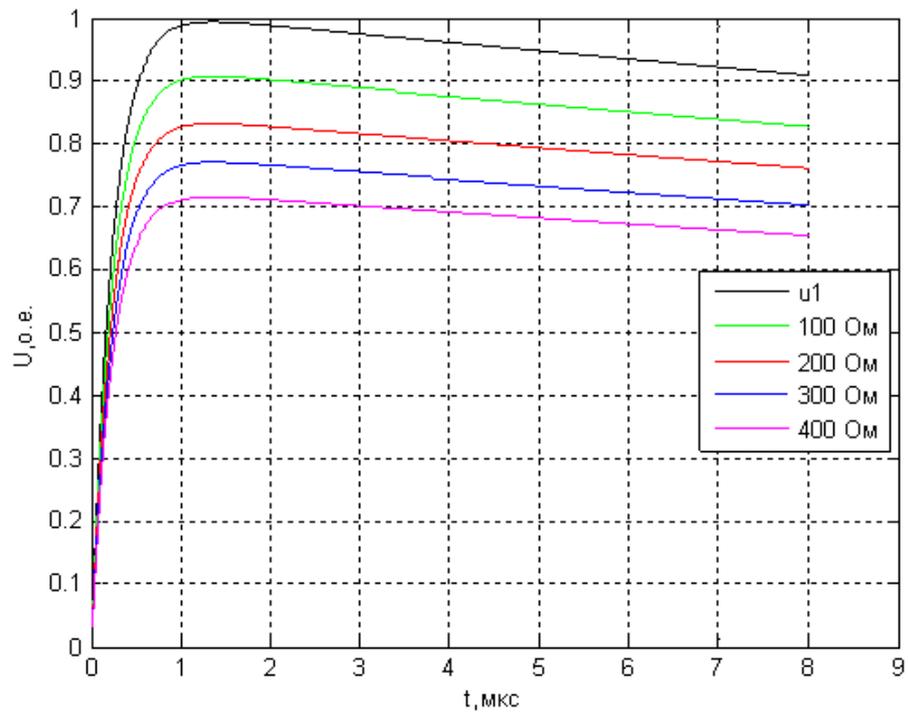
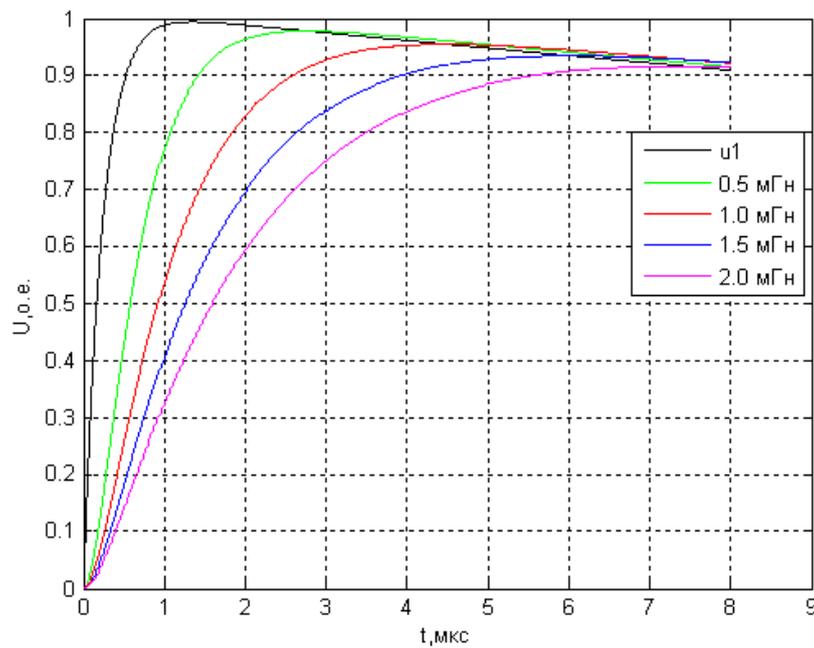


Рисунок 4.17 - К анализу эффективности различных аппаратных мер по сглаживанию крутизны набегающих с ВЛ полной (а), срезанной (б) и короткой (в) волн напряжения при следующих параметрах устройств: ЧЗУ: 96,4 Ом 2,5 мГн; СР: 0,57 Ом 1,0 мГн; КС: 6,4 нФ; СР+КС: 1 мГн + 6,4 нФ

На рисунках 4.18- 4.19 приведены компьютерные осциллограммы для анализа влияния отдельно активного и индуктивного сопротивлений на величину снижения крутизны набегающих с ВЛ полной и срезанной волн напряжения.

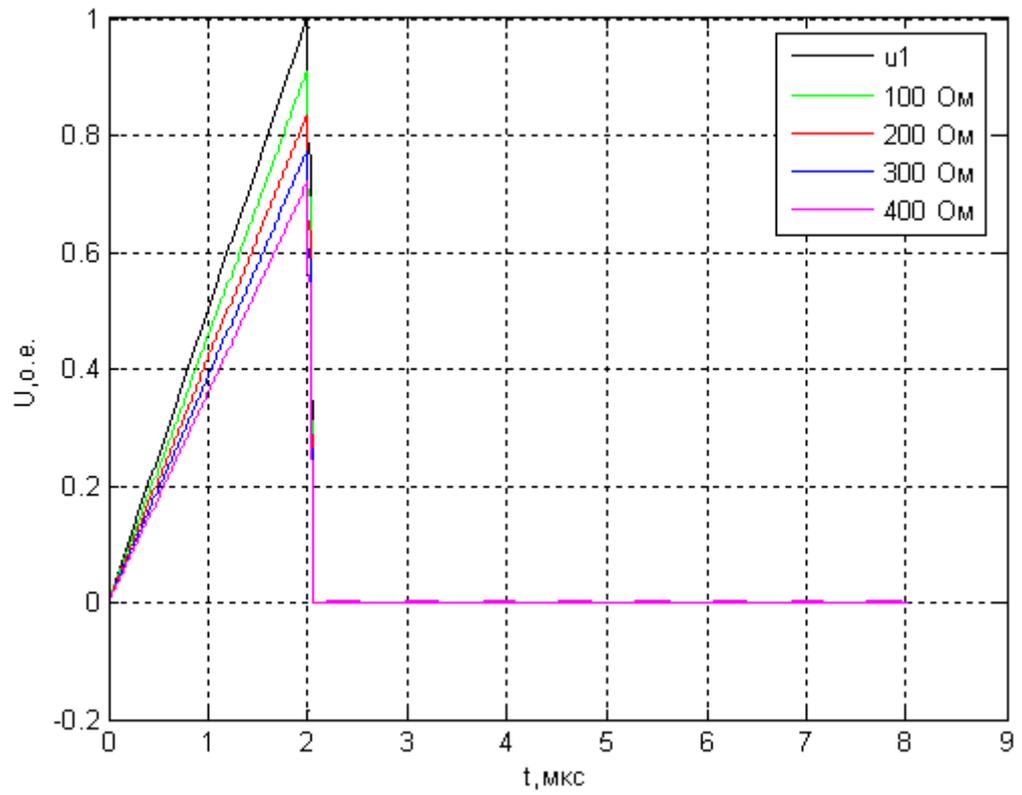


a)

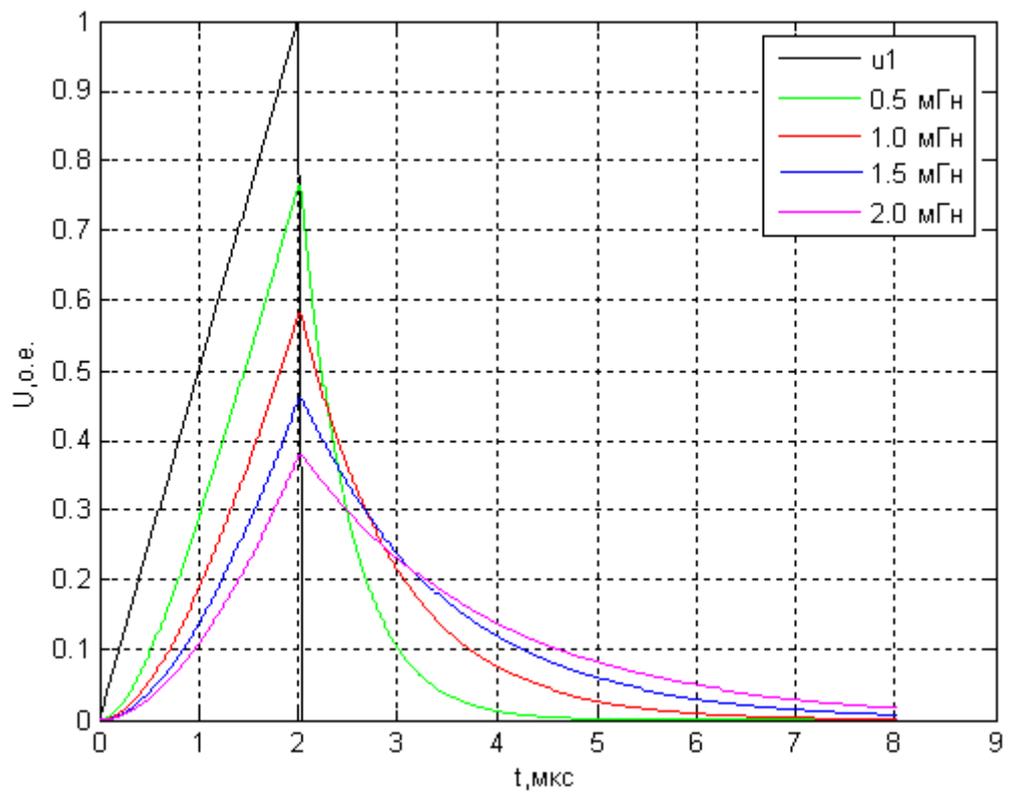


б)

Рисунок 4.18 - К анализу влияния отдельно активного (а) и индуктивного (б) сопротивлений на искажение формы полной волны



а)



б)

Рисунок 4.19 - К анализу влияния отдельно активного (а) и индуктивного (б) сопротивлений на искажение формы срезанной волны

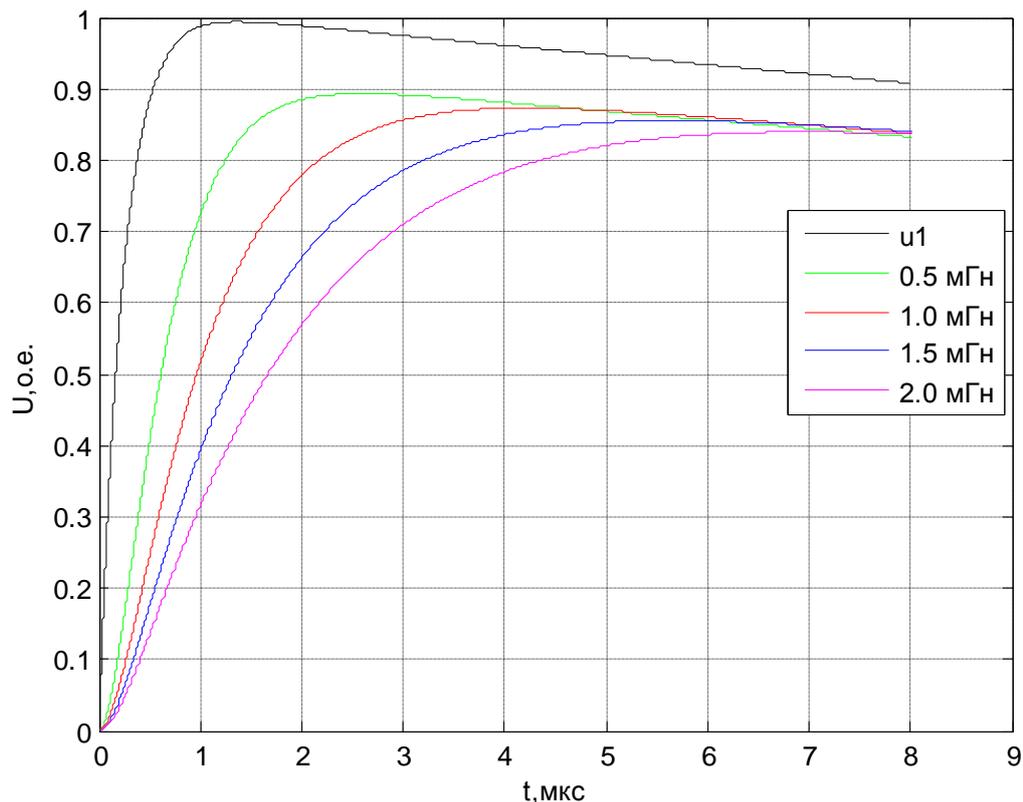


Рисунок 4.20 - К анализу влияния ЧЗУ на искажение формы импульса полной волны при варьировании его индуктивности и активном сопротивлении 100 Ом

Анализ эффективности снижения крутизны импульса в зависимости от типа применяемых аппаратов проводился при следующих параметрах (рисунки 4.14-4.17):

- ЧЗУ при  $R = 96,4 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,5 \text{ мГн}$ ;
- СР при  $R = 0,57 \text{ Ом}$ ,  $L = 1,0 \text{ мГн}$  (один СР) и  $R = 1,14 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,0 \text{ мГн}$  (два СР);
- КС при  $C = 6,4 \text{ нФ}$  (один КС) и  $C = 12,8 \text{ нФ}$  (два КС);
- СР+КС при  $R = 0,57 \text{ Ом}$ ,  $L = 1,0 \text{ мГн}$ ,  $C = 6,4 \text{ нФ}$ .

Из полученных компьютерных осциллограмм (рисунок 4.14) видно, что наиболее эффективной мерой по снижению крутизны полной волны является применение ЧЗУ, менее действенное влияние оказывают СР и КС. При применении же двух комплектов СР (или двух комплектов КС), а также при совместном использовании одного СР и одного КС эффект по снижению крутизны практически аналогичен эффекту от применения ЧЗУ.

При набегании с ВЛ срезанной волны (рисунок 4.15) случай совместного применения по одному комплекту КС и СР оказывает более выраженный эффект, далее по эффективности следует ЧЗУ. Следует отметить, что отдельное применение одного СР или одного КС (как и применение этих аппаратов по отдельности в двух экземплярах) дают практически одинаковый эффект по сглаживанию переднего и заднего фронтов срезанной волны напряжения. При этом использование двух СР или двух КС дает деформацию срезанного импульса аналогично случаю применения ЧЗУ.

При воздействии коротких волн практически одинаковый эффект по снижению крутизны импульса напряжения дают случаи применения ЧЗУ, СР+КС, двух СР или двух КС.

На рисунке 4.17 для наглядности приведен характер изменения импульсов после прохождения полной, срезанной и короткой волн через различные аппараты, демпфирующие ВЧ-перенапряжения. В данном случае рассматривается применение по одному комплекту СР (или КС), а также по одному комплекту при их совместной установке. В таблице 4.6 приведены значения крутизны для различных защитных мер. Крутизна ( $A$ ) определялась из полученных компьютерных осциллограмм по формуле:

$$A = (U_2 - U_1) / (t_2 - t_1),$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  – соответственно значения напряжений на фронте импульса на уровне 0,1 и 0,9 от амплитуды импульса;

$t_1$ ,  $t_2$  – соответственно время нарастания напряжения до уровня 0,1 и 0,9 от амплитуды импульса.

**Таблица 4.6 - Снижения крутизны  $A$  (о.е./мкс) при использовании различных защитных устройств**

Тип волны	Исходный импульс	ЧЗУ	СР	КС	КС+СР
полная	1,60	0,17	0,46	0,24	0,20
срезанная	0,50	0,12	0,32	0,25	0,14
короткая	8,80	0,17	0,49	0,26	0,22

Анализ приведенных данных показывает, что применение различных аппаратных средств приводит к снижению крутизны набегающей с ВЛ волны. При этом эффективность подавления ВЧ-перенапряжений зависит от величины параметров аппаратов (активного сопротивления, индуктивности и емкости).

В отличие от СР частотозависимое устройство имеет значительное активное сопротивление. На рисунках 4.18 и 4.19 показан характер изменения фронта импульса напряжения при варьировании активного и индуктивного сопротивлений ЧЗУ. Из приведенных данных видно, что основную долю в искажение импульса вносит реактивная составляющая комплексного сопротивления ЧЗУ. В качестве примера на рисунке 4.20 показано влияние реактанса ЧЗУ при постоянном значении активной составляющей полного сопротивления (100 Ом).

#### **4.6 Численный анализ эффективности применения частотозависимого устройства при его установке на подстанциях напряжением 110 кВ**

По данным службы изоляции и защиты от перенапряжений филиала ОАО «Тюменьэнерго» - Ноябрьские электрические сети подстанции напряжением 110 кВ структурно имеют в основном две принципиальные схемы:

- проходная ПС-110/35/6 кВ, имеющая схему «мостик» (например, ПС «Трудовая», принципиальная схема которой приведена на рисунке 4.21 и «Сугмутская», рисунок 4.22), при этом возможны следующие режимы эксплуатации ПС – «2ВЛ и 2СТ», «1 ВЛ и 2 СТ», «2ВЛ и 1 СТ», «1 ВЛ и 1 СТ»;

- многофидерная ПС-110/35/10 кВ, работающая с двойной системой шин (например, ПС «Новогодняя»).

Для первого типа ПС характерно наличие двух силовых трансформаторов и двух примыкающих ВЛ, для второго типа – четырех силовых трансформаторов и шести примыкающих ВЛ. Очевидно, что в первом случае уровень грозových

перенапряжений, воздействующих на изоляцию наиболее ответственного оборудования (силовых трансформаторов) будет наибольшим.

Эквивалентная расчетная схема замещения ПС «Трудовая» приведена на рисунке 4.23, в которой оборудование ПС было заменено их входными емкостями на грозовой частоте согласно табл.4.7.

**Таблица 4.7 – Значения входных ёмкостей оборудования ПС в эквивалентной расчётной схеме**

Вид оборудования	Значение входной емкости, пФ
Силовой трансформатор	1600
Трансформатор напряжения	300
Выключатель	40
Разъединитель	60
РВМГ	60
Трансформатор тока	150
Ошиновка (на 1 пог.м)	7,9

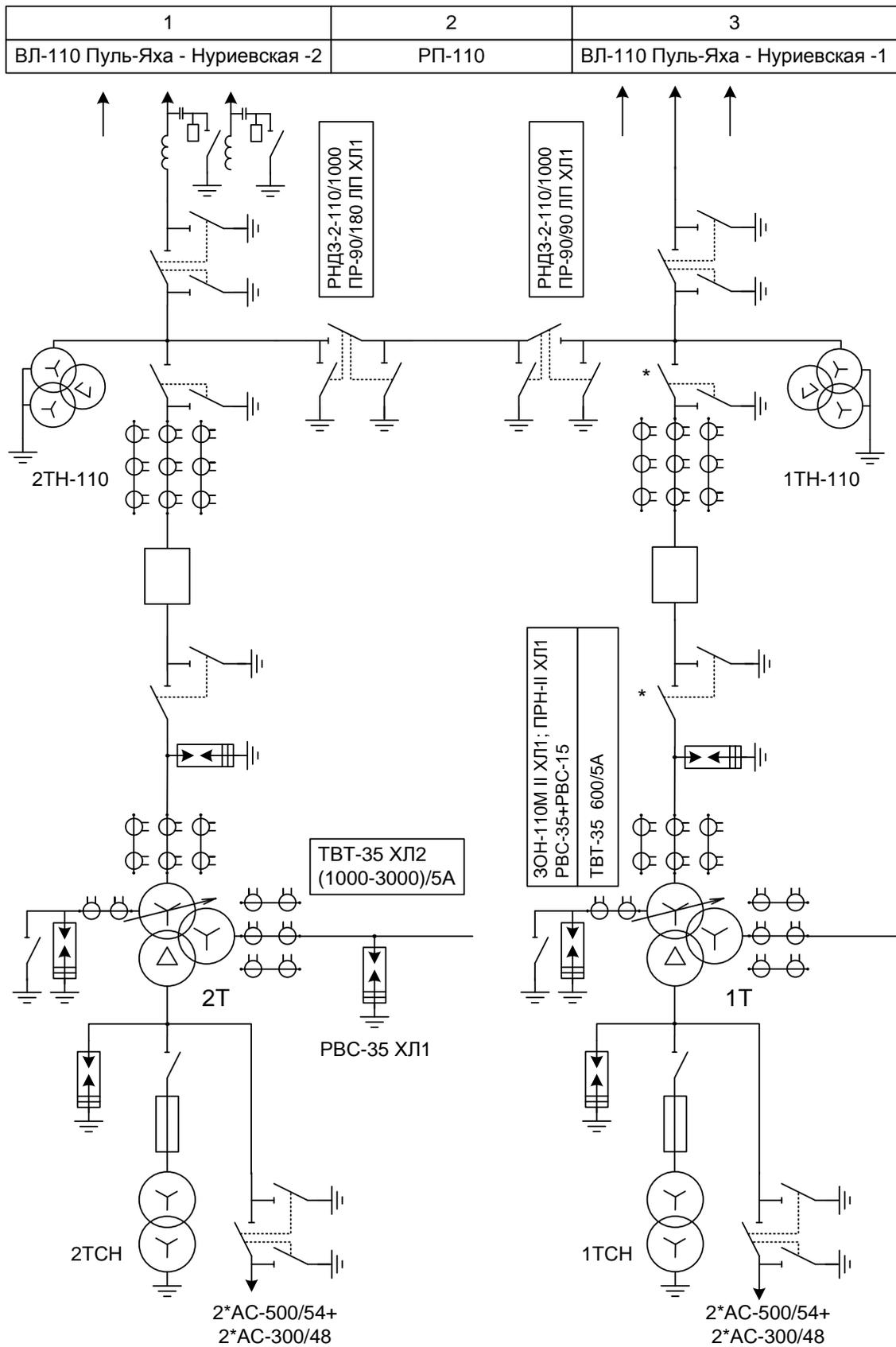


Рисунок 4.21 - Принципиальная схема электрических соединений ПС 110 кВ «Трудовая»

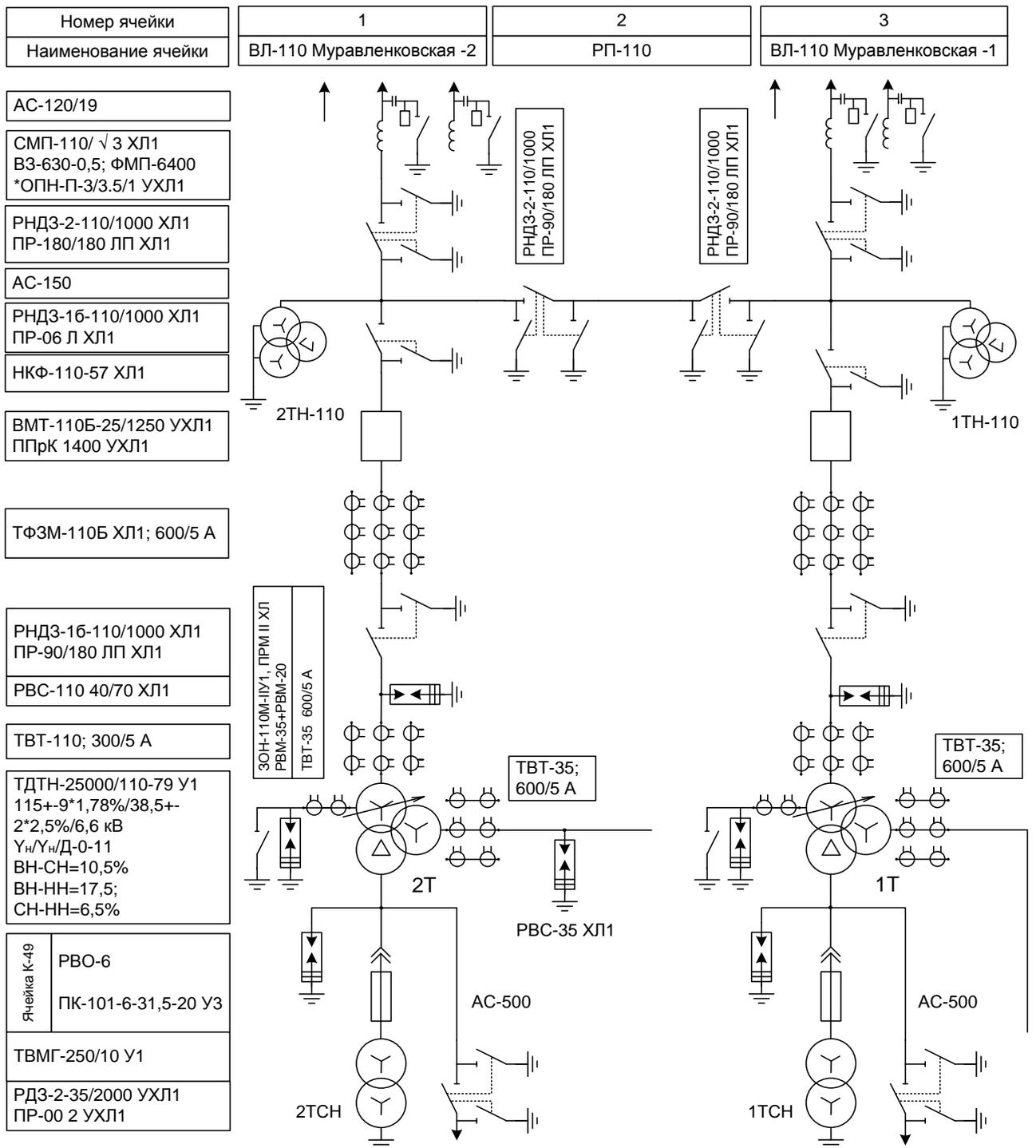


Рисунок 4.22 - Принципиальная схема электрических соединений ПС-110/35/6 кВ

Сугмутская

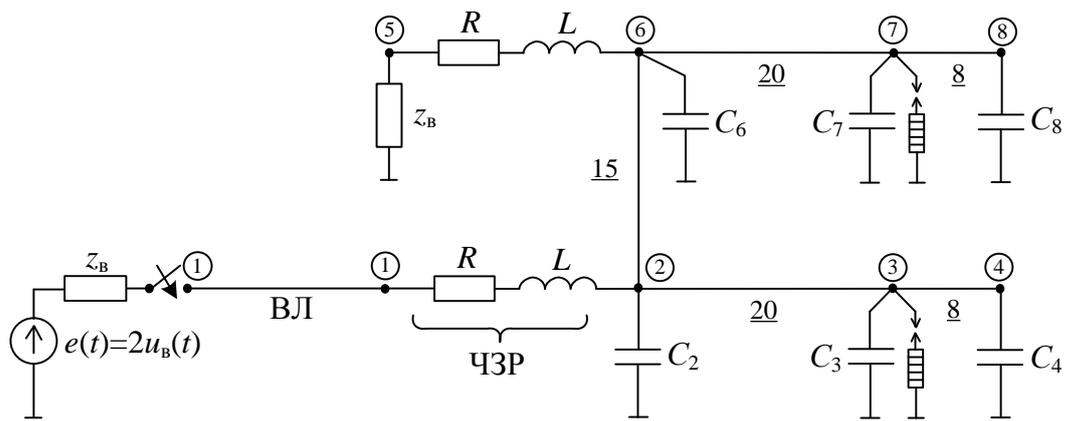
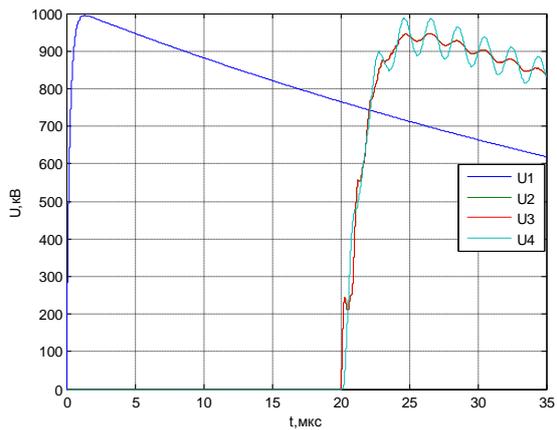


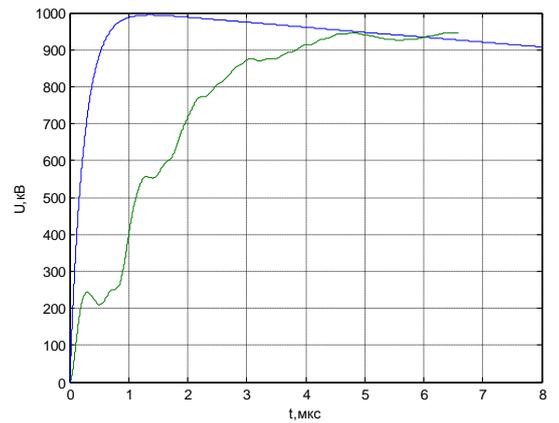
Рисунок 4.23 - Эквивалентная расчетная схема ПС «Трудовая»

Для наглядности и качественного сравнения эффективности применения ЧЗУ на рисунках 4.24 и 4.25 приведены компьютерные осциллограммы перенапряжений в различных точках ПС «Трудовая» при набегании с ВЛ полной волны соответственно при отсутствии и наличии защитных аппаратов на ПС, а также отсутствии и наличии ЧЗУ. При установке на ПС частотозависимого устройства его параметры отвечают:

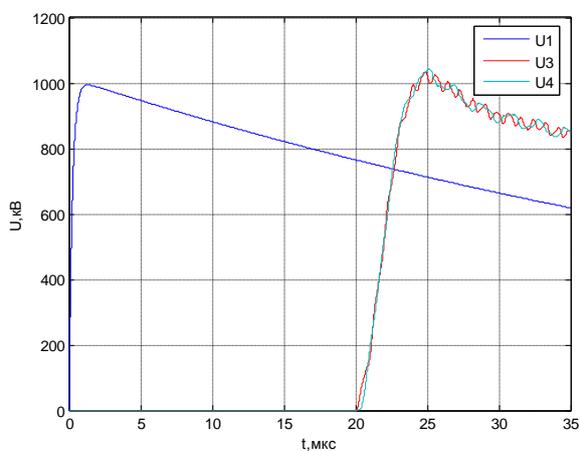
- варианту №2 табл.4.5 – рисунок 4.24 в, г и рисунок 4.25 д, е;
- варианту №3 табл.4.5 – рисунок 4.24 в, г и рисунок 4.25 д, е.



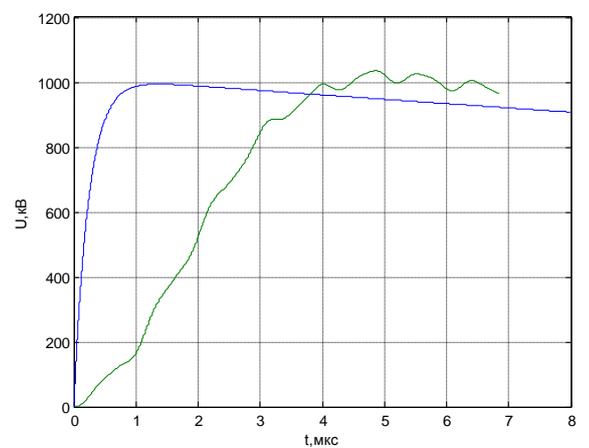
а)



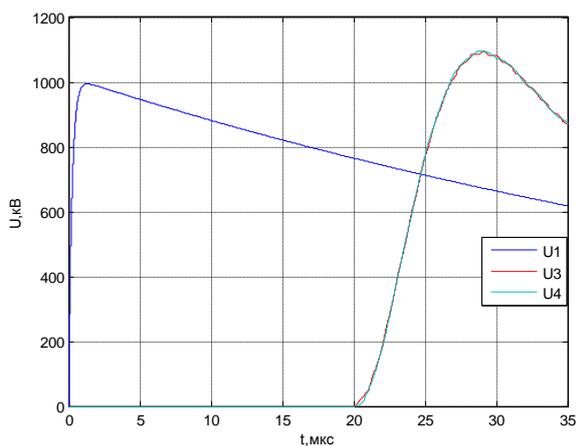
б)



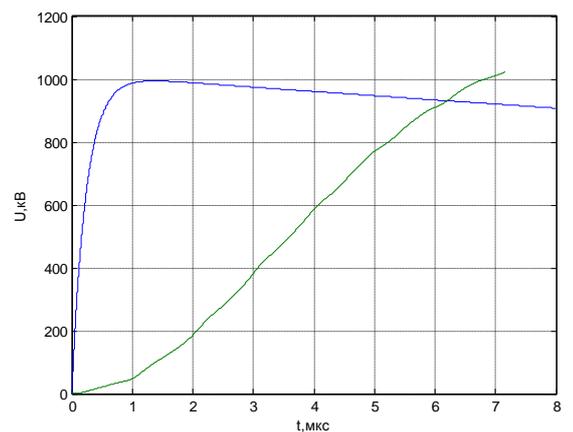
в)



г)

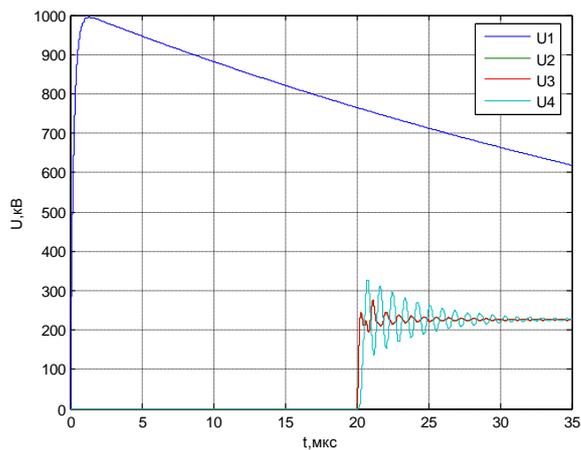


д)

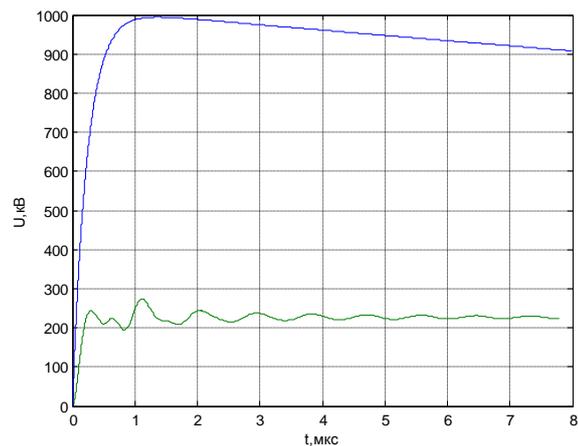


е)

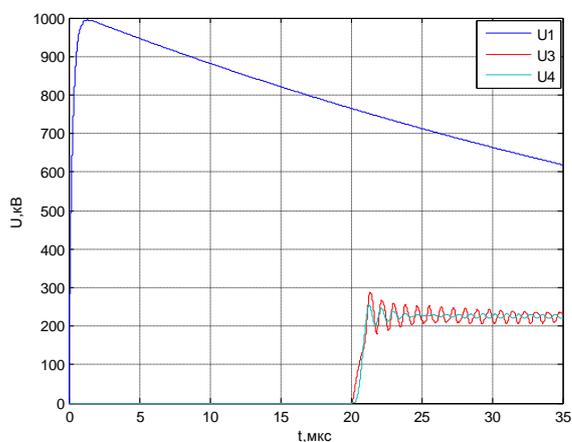
Рисунок 4.24 - Компьютерные осциллограммы неограниченных перенапряжений, воздействующих на изоляцию оборудования ПС «Трудовая» при набегании с ВЛ полной волны: на рисунках: а, б – при отсутствии на ПС ЧЗУ; в, г, д, е – при наличии на ПС ЧЗУ; на рисунках: б, г, е – набегающая с ВЛ волна (----) и перенапряжения на изоляции силового трансформатора (-----)



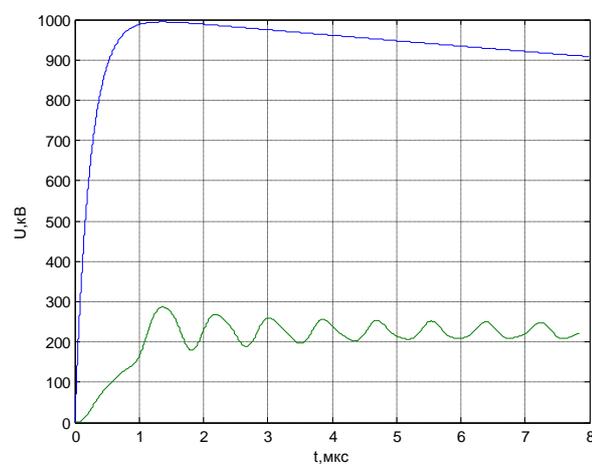
а)



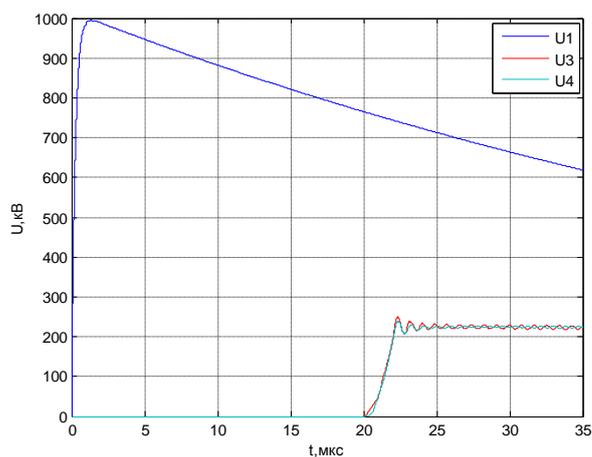
б)



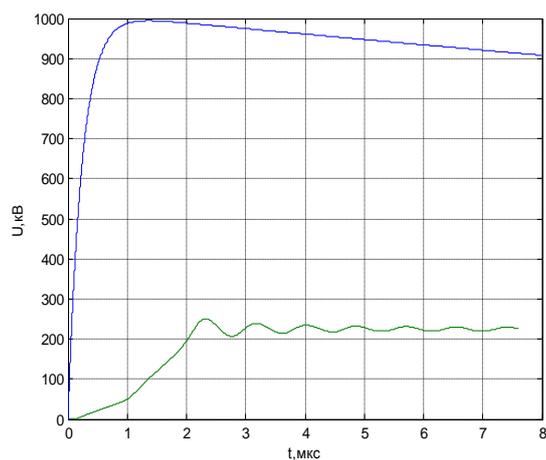
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4.25 - Компьютерные осциллограммы ограниченных перенапряжений, воздействующих на изоляцию оборудования ПС «Трудовая» при набегании с ВЛ полной волны: на рисунках: а,б – при отсутствии на ПС ЧЗР; в,г,д,е – при наличии на ПС ЧЗУ; на рисунках: б, г,е – набегаящая с ВЛ волна (-----) и перенапряжения на изоляции силового трансформатора (-----)

Из приведенных осциллограмм видно, что установка ЧЗУ на пути набегания с ВЛ на ПС грозового импульса напряжения приводит к существенному изменению начального участка формы воздействующих на изоляцию силовых трансформаторов (СТ) волн перенапряжений. В частности, время нарастания напряжения до уровня остающегося напряжения на РВМГ увеличилось примерно с 0,3 мкс до величины около 2,5 мкс, то есть в 8-9 раз снизилась крутизна формы, воздействующих на изоляцию силовых трансформаторов перенапряжений, что очевидно, благоприятно скажется на надежности эксплуатации продольной (витковой) изоляции СТ.

На рисунок 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 приведены компьютерные осциллограммы грозовых перенапряжений в различных точках ПС «Новогодняя» при наличии и отсутствии ЧЗУ и варьировании его параметров. На ПС установлены вентильные разрядники (РВМГ-110) только у трансформаторов. На рисунках применены следующие обозначения:

V(PORTAL) - напряжение на входе ПС (линейный портал);

V(OB) - напряжение на оборудовании ПС после прохождения волной ЧЗУ (т.е. сразу за ЧЗУ);

V(dU\_RESISTOR) - продольное напряжение на ЧЗУ;

V(1T) - напряжение на трансформаторах Т1 (или Т2).

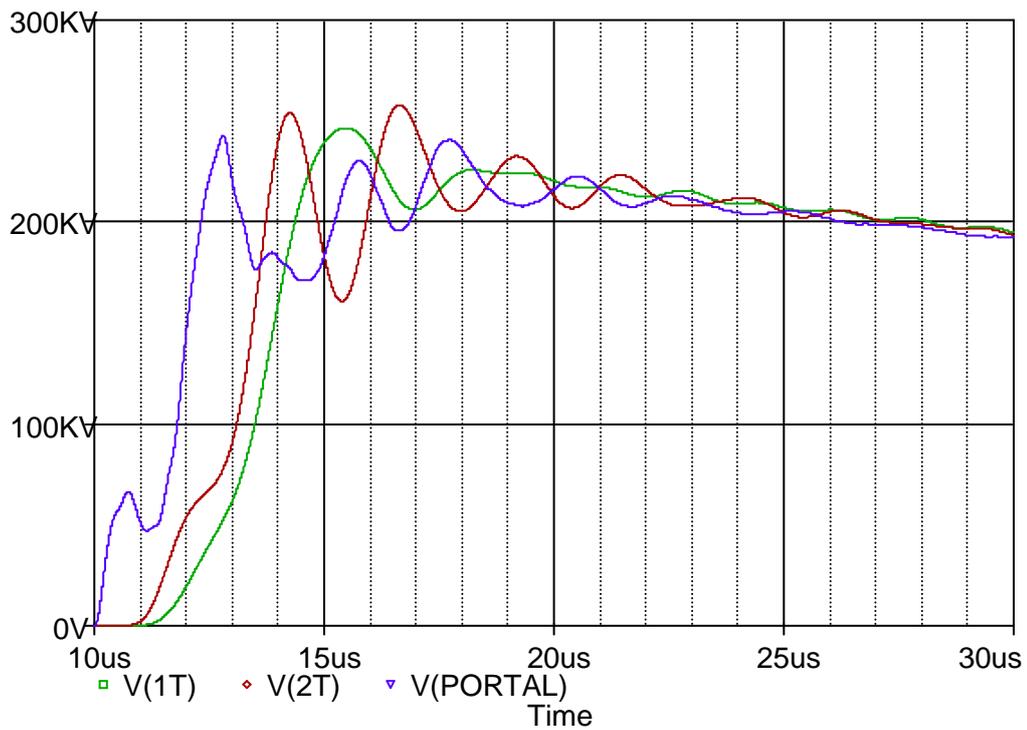


Рисунок 4.26 - ПС Новогодняя (отключены БСК и УШР, набегание волны перенапряжения с ВЛ Губкинская-2, ЧЗУ нет)

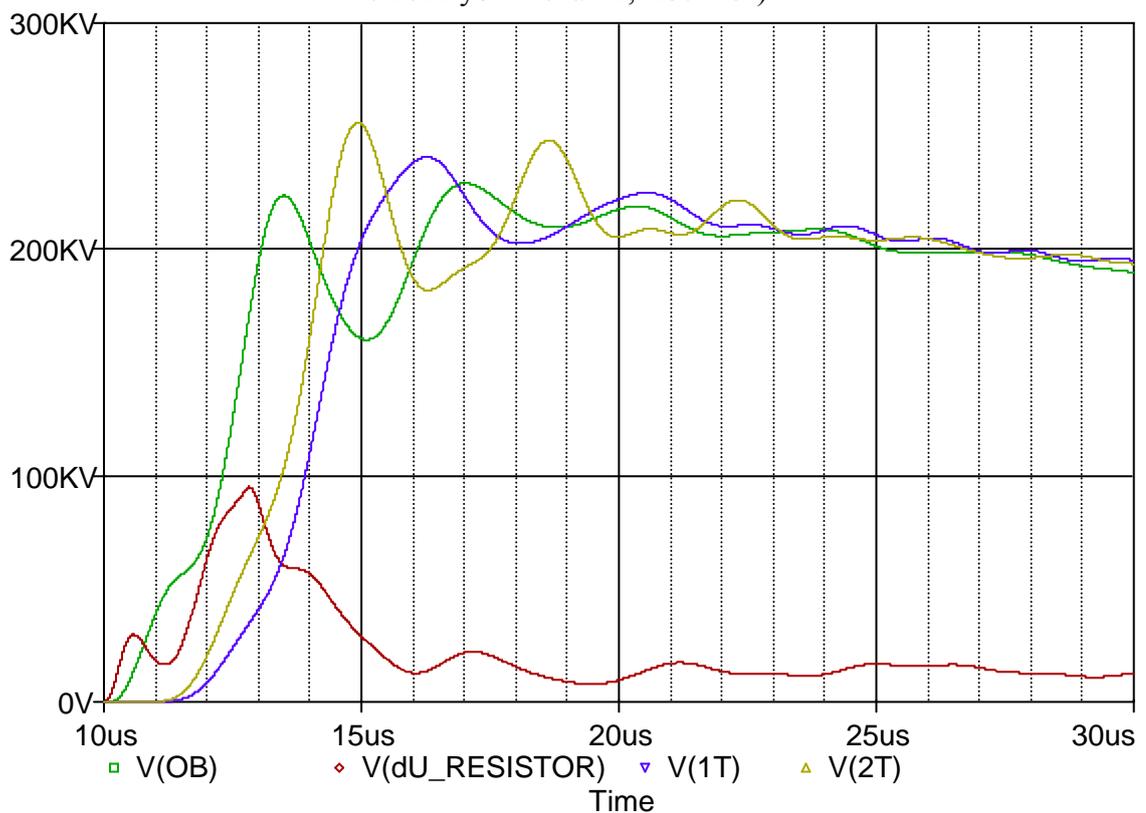


Рисунок 4.27 - ПС Новогодняя (отключены БСК и УШР, набегание с ВЛ Губкинская-2,  $I_{\text{ЧЗУ}}=40 \text{ м}$ )

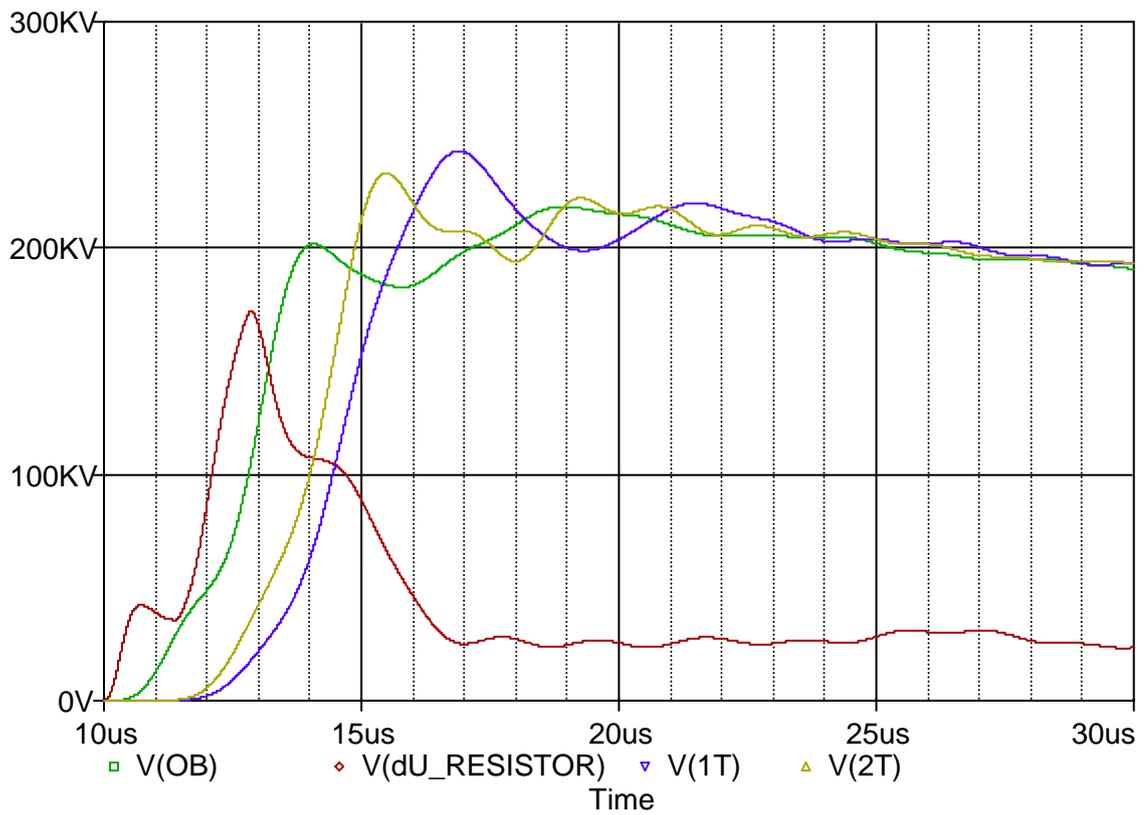


Рисунок 4.28 - ПС Новогодняя (отключены БСК и УШР, набегание с ВЛ Губкинская-2,  $I_{ч3у}=80$  м)

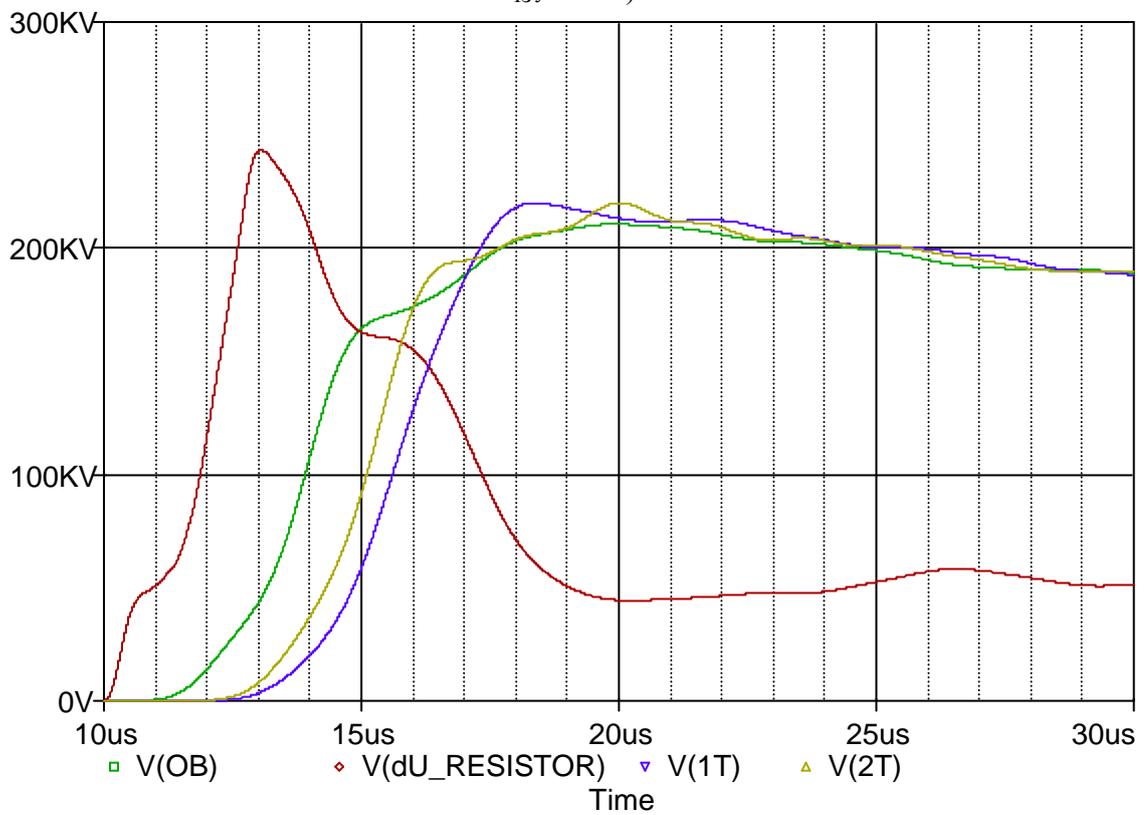


Рисунок 4.29 - ПС Новогодняя (отключены БСК и УШР, набегание с ВЛ Губкинская-2,  $I_{ч3у}=160$  м)

На рисунках 4.30 и 4.31 в качестве примера показано влияние реактора на форму изменения кривых напряжений в различных точках ПС «Трудовая» и «Новогодняя» при варьировании величины индуктивности в диапазоне от 0,5 до 5,0 мГн с шагом 0,5 мГн.

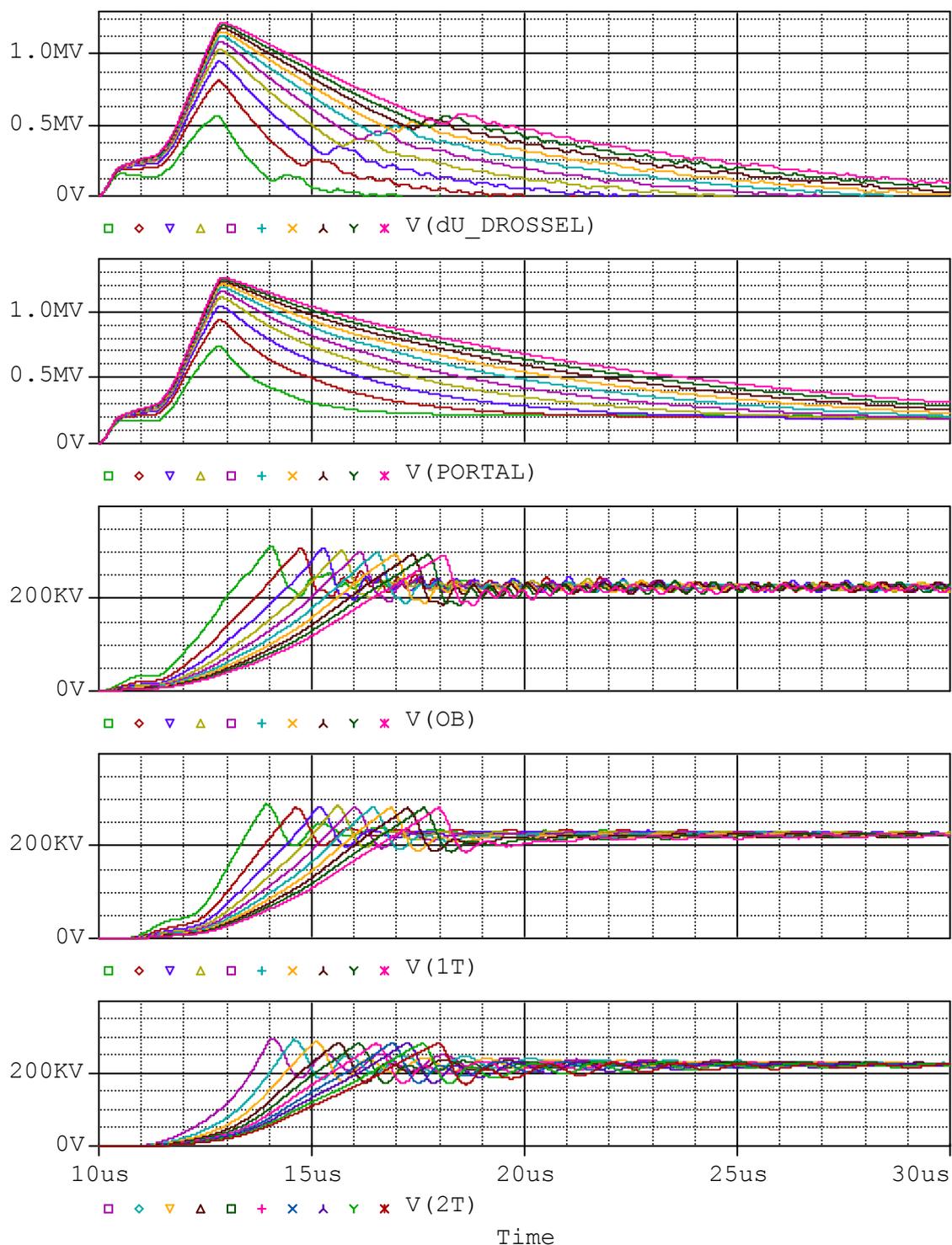


Рисунок 4.30 - Влияние реактора на форму перенапряжений в различных точках ПС «Трудовая»

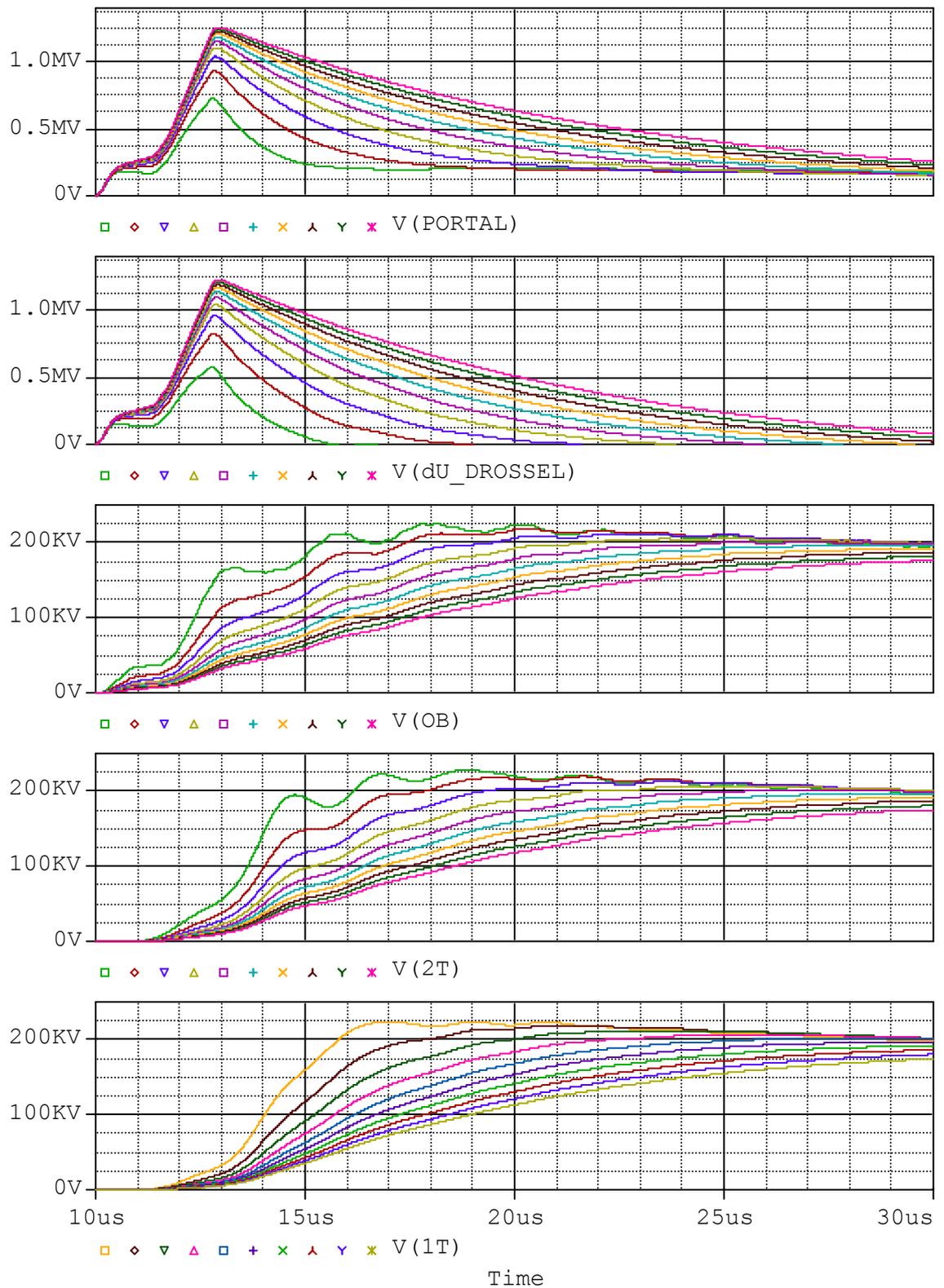
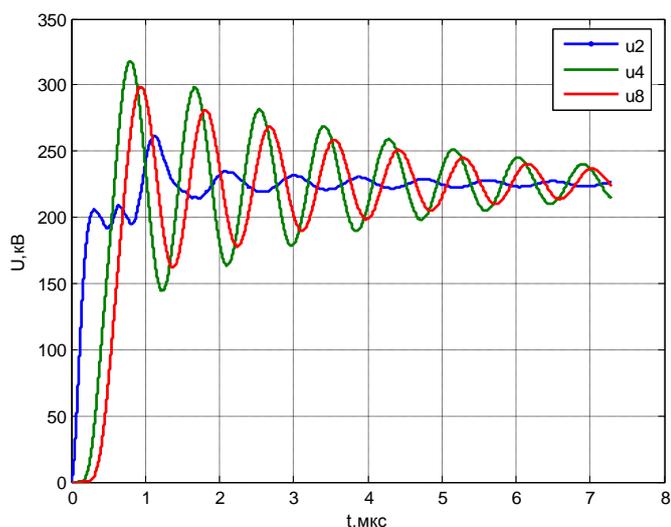


Рисунок 4.31 - Влияние реактора на форму перенапряжений в различных точках ПС «Новогодняя»

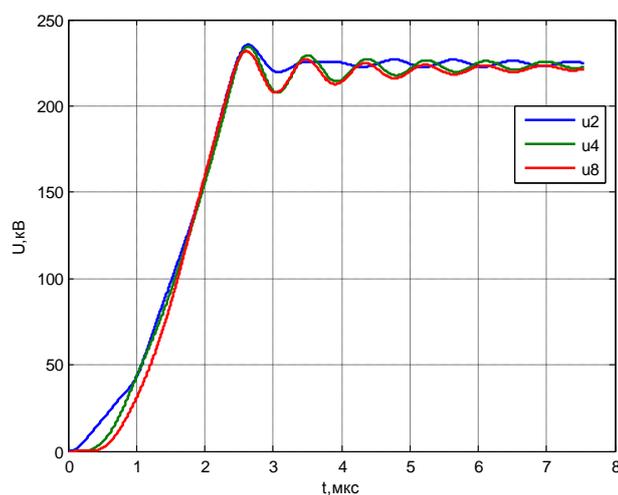
На рисунках принято обозначение: V(dU\_DROSSEL) – напряжение на реакторе.

Как видно из графиков, приведённых на рисунках 4.30 и 4.31, силовые реакторы значительно снижают крутизну фронта волны перенапряжения, но практически не влияют на её амплитуду.

Для сравнения на рисунках 4.32 и 4.33 приведены компьютерные осциллограммы перенапряжений в различных точках ПС напряжением 110 кВ «Сугмутская» при отсутствии и наличии на входе подстанции ЧЗУ с параметрами  $R = 100 \text{ Ом}$ ,  $L = 2,5 \text{ мГн}$  для двух режимов ПС (2ВЛ и 2СТ, а также 1ВЛ и 1СТ).

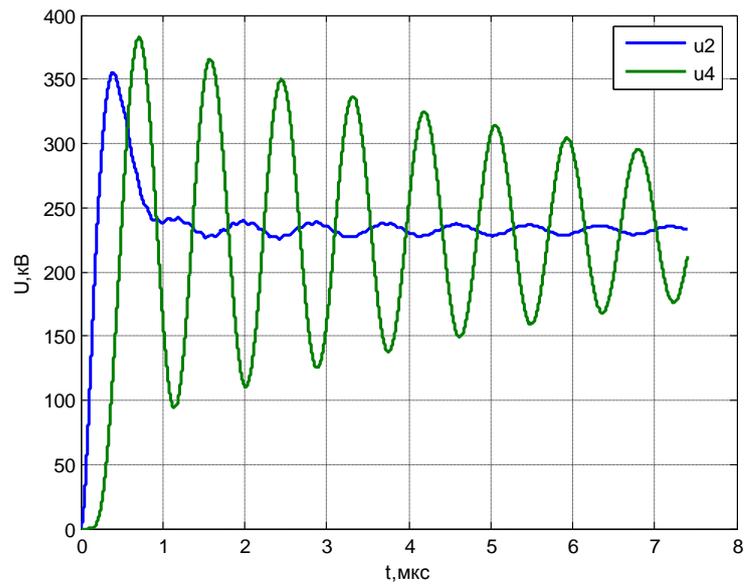


а)

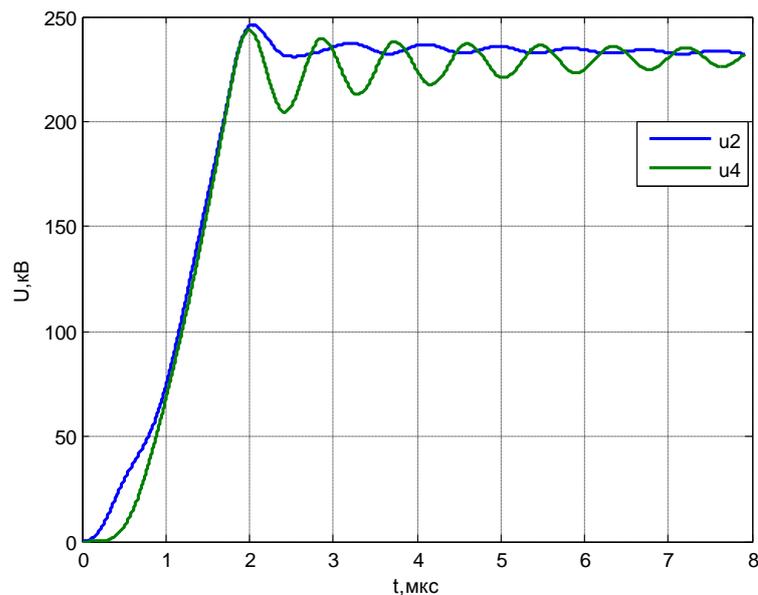


б)

Рисунок 4.32 - Компьютерные осциллограммы перенапряжений в различных точках ПС напряжением 110 кВ «Сугмутская» при отсутствии (а) и наличии (б) на входе ПС ЧЗУ (режим эксплуатации подстанции - 2ВЛ и 2СТ)



а)



б)

Рисунок 4.33 - Компьютерные осциллограммы перенапряжений в различных точках ПС напряжением 110 кВ «Сугмутская» при отсутствии (а) и наличии (б) на входе ПС ЧЗУ (режим эксплуатации подстанции - 1ВЛ и 1 СТ)

Из приведенных на рисунках 4.32а и 4.33а компьютерных осциллограмм видно, что при отсутствии мер защиты (ЧЗУ не установлен на ПС) время нарастания первого максимума перенапряжений ( $\tau_1$ ) на изоляции СТ и период

колебаний  $T$ , который характеризует скорость спада и нарастания напряжения на колебательной составляющей импульсных перенапряжений составляют:

-  $\tau_1 = 0,6$  мкс и  $T = 0,9$  мкс для случая, когда ПС эксплуатируется в режиме полной схемы (в работе находятся два трансформатора и две линии);

-  $\tau_1 = 0,4$  мкс и  $T = 0,9$  мкс для наиболее тяжелого случая эксплуатации ПС, когда отключена вторая половина схемы (1 ВЛ и 1 СТ).

Меньшее значение  $\tau_1$  во втором случае объясняется большим уровнем перенапряжений на изоляции СТ за счет снижения постоянной заряда схемы вследствие меньшей эквивалентной емкости схемы и наличия лишь одной ВЛ. Рассматриваемый случай отвечает максимальному частотному спектру перенапряжений, неоднократное воздействие которых может привести к ускорению процесса старения витковой изоляции либо к ее повреждению.

При установке ЧЗУ за счет резкого увеличения активного сопротивления и суммарной индуктивности на высоких частотах, амплитуда и крутизна импульсных перенапряжений, воздействующих на изоляцию СТ значительно уменьшаются. Сравнение компьютерных осциллограмм расчетных случаев а) и б) на рисунках 4.32 и 4.33 показывают, что наличие индуктивности ЧЗУ наряду со снижением скорости нарастания напряжения на фронте импульсных перенапряжений приводит также и к уменьшению амплитуды колебательной составляющей, наложенной на остающееся напряжение защитного аппарата.

Как было отмечено выше наиболее тяжелый случай для витковой изоляции СТ отвечает случай эксплуатации ПС в тупиковом режиме (1ВЛ+1СТ). Таким образом, установка ЧЗУ как аппаратная мера по подавлению ВЧ-перенапряжений наиболее эффективна при эксплуатации ПС с минимальным количеством СТ и отходящих от шин ПС ВЛ.

На практике встает вопрос о целесообразности применения аппаратных мер по подавлению ВЧ-перенапряжений в зависимости от развития (конфигурации) ПС. Для решения этого вопроса необходимо иметь информацию по электрической прочности витковой изоляции СТ с учетом ее деградации в процессе эксплуатации за счет кумулятивного эффекта. Таких данных, к

сожалению, в настоящее время нет. Наличие такой информации позволило бы обозначить область применения ЧЗУ для снижения градиентных перенапряжений на витковой изоляции СТ до требуемого значения в зависимости от конфигурации ПС. Очевидно, что для многофидерных подстанций может быть и не целесообразно применять ЧЗУ по ограничению ВЧ-перенапряжений, что обусловлено во-первых, значительной суммарной емкостью подстанционного оборудования и большим количеством отходящих от шин ПС ВЛ, и, во-вторых, необходимостью установки большого количества (может быть и необоснованно) ЧЗУ на примыкающих к ПС воздушных линиях.

#### 4.7 Выводы по главе 4

Проведенные численные исследования по анализу эффективности различных аппаратных устройств для подавления ВЧ-перенапряжений позволяют сделать следующие методические выводы.

1. Из четырех рассматриваемых аппаратных мер наиболее ярко выражены демпфирующие свойства по снижению крутизны набегающего с ВЛ импульса напряжения у частотозависимого устройства. Это обусловлено тем, что наряду с индуктивностью ЧЗУ имеет значительную активную составляющую полного сопротивления.

2. Наряду с ЧЗУ силовой реактор ВЧ-заградителя и конденсатор связи также могут рассматриваться в качестве аппаратных устройств по подавлению ВЧ-перенапряжений, которые в процессе эксплуатации могут воздействовать на витковую изоляцию силовых трансформаторов и кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Применение двух комплектов СР (с индуктивностью каждого по 1 мГн) или двух комплектов КС (с емкостью каждого 6,4 нФ) дает практически такой же эффект по подавлению ВЧ-перенапряжений как и применение ЧЗУ.

3. Одним из преимуществ применения силового реактора или конденсатора связи для подавления ВЧ-перенапряжений является их существующее промышленное производство.

4. В качестве четвертой меры подавления ВЧ-перенапряжений может рассматриваться случай совместного применения одного СР и одного КС. Комбинированное использование СР и КС дает результат практически одинаковый по сравнению с тремя выше рассмотренными случаями.

Численный анализ эффективности применения частотозависимого устройства при его установке на подстанциях напряжением 110 кВ подтверждает защитное действие ЧЗУ при воздействии грозových волн, набегающих с ВЛ на ПС. Защитное действие ЧЗУ имеет место в схемах ПС с числом отходящих ВЛ не менее 2 и проявляется в увеличении длительности фронта импульса напряжения, воздействующего на оборудование ПС.

Такой же вывод следует из отчета о научно-исследовательской работе «Проведение высоковольтных испытаний опытных образцов частотозависимого резистора», сделанный в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» – «СибНИИЭ» [94].  
(Приложение 1)

## Глава 5. Экспериментальные исследования опытного образца и его элементов

В настоящем разделе работы приводятся результаты экспериментальных определений характеристик опытных образцов частотозависимого устройства при проведении низковольтных и сильноточных измерений.

### 5.1 Измерение полного сопротивления ЧЗУ

Измерение полного сопротивления проводилось по методу амперметра-вольтметра. Схема измерения приведена на рисунке 5.1.

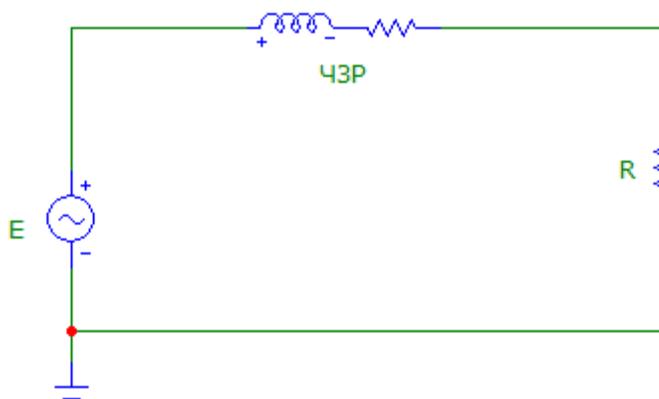


Рисунок 5.1 - Электрическая схема испытательной установки

В качестве источника напряжения использовался генератор SFG-2110 (производство GW instek), со следующими параметрами:

- выходное напряжение 10 В;
- внутреннее сопротивление источника 50 Ом.

С помощью осциллографа DL 750 (производство YOKOGAWA) проводился замер напряжения на ЧЗУ и на низкоиндуктивном сопротивлении R (величина индуктивности около 2мкГн, сопротивление 50 Ом).

Значение полного сопротивления определялось как:

$$Z = R \cdot \frac{U_{\text{ЧЗУ}}}{U_R} \quad (5.1)$$

Кроме того, проводилось измерение угла между этими двумя напряжениями, что позволило вычислить активное и индуктивное сопротивления по следующим выражениям:

$$R_{\text{ЧЗУ}} = Z \cdot \cos\varphi \quad X_{\text{ЧЗУ}} = Z \cdot \sin\varphi, \quad (5.2)$$

Опытные образцы ЧЗУ отличались друг от друга только количеством секций сплошной намотки провода на основание (рисунки 5.2, 5.3, 5.4). Результаты измерений сопротивления образцов и их индуктивности приведены в таблицах 5.1, 5.2 и 5.3 соответственно.



Рисунок 5.2 - Фотография ЧЗУ1

Таблица 5.1 - Результаты измерения по ЧЗУ 1

F(кГц)	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50	100	150	200
Z(Ом)	0,5	0,98	4,82	9,56	42,64	90,74	442,9	920,2	1521	2369
R(Ом)	0,09	0,12	0,15	0,6	1,34	5,7	27,81	57,78	95,47	148,8
L(мГн)	1,572	1,545	1,534	1,519	1,357	1,141	1,407	1,462	1,61	1,882

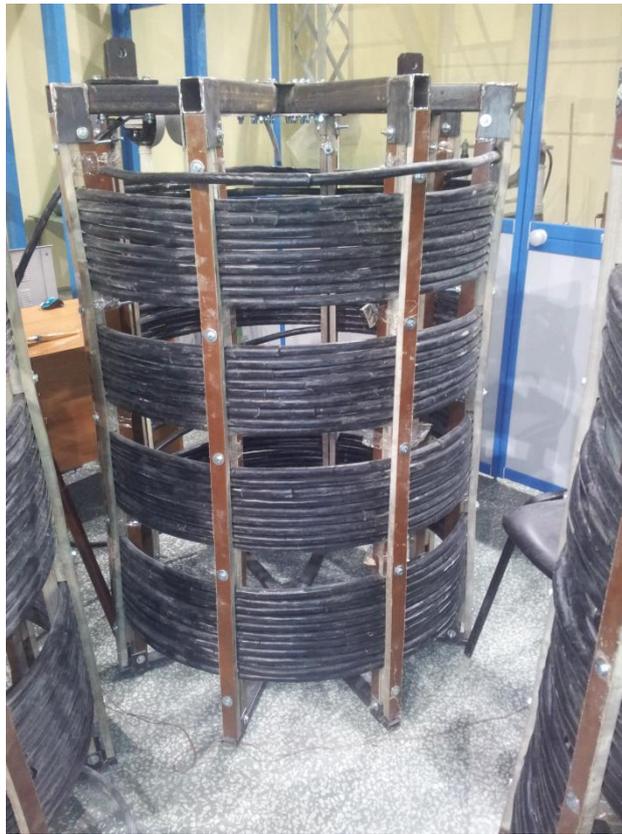


Рисунок 5.3 - Фотография ЧЗУ 2

Таблица 5.2 - Результаты измерения по ЧЗУ 2

F(кГц)	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50	100	150	200
Z(Ом)	0,46	0,88	4,39	8,5	41,84	79,92	370,3	756,9	1238	1885
R(Ом)	0,09	0,11	0,82	1,59	2,63	5,02	23,25	47,53	77,72	118,4
L(мГн)	1,426	1,396	1,372	1,328	1,329	1,269	1,176	1,202	1,311	1,498

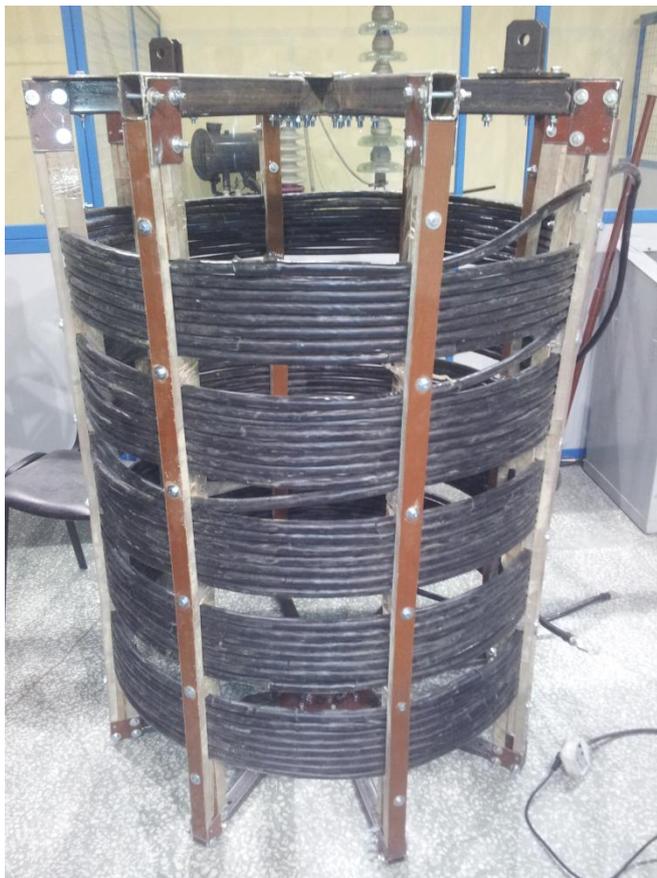


Рисунок 5.4 - Фотография ЧЗУ 3

Таблица 5.3 - Результаты измерения по ЧЗУ 3

F(кГц)	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50	100	150	200
Z(Ом)	0,41	0,79	3,89	7,72	37,91	74,81	358,9	736,6	1187	1792
R(Ом)	0,03	0,07	0,37	0,48	1,19	4,94	5,64	23,14	74,54	112,5
L(мГн)	1,304	1,252	1,232	1,227	1,206	1,191	1,142	1,172	1,257	1,423

Измерения ограничены частотой в 200 кГц, поскольку при дальнейшем увеличении частоты наблюдалось явление резонанса, вызванное равенством индуктивного сопротивления ЧЗУ и емкостного сопротивления схемы измерения. Частота резонанса была порядка 300-330 кГц.

В приведенных таблицах величина активного сопротивления могла быть определена с некоторой погрешностью, обусловленной трудностью определения угла между током в схеме и напряжением на ЧЗУ. Поскольку величина активного сопротивления на 1-2 порядка ниже индуктивного сопротивления, то погрешность

измерения угла оказывала существенное влияние на величину активного сопротивления и очень небольшое влияние на величину индуктивности.

По результатам измерений построены графики зависимости активного, полного сопротивления и индуктивности образцов от частоты входного сигнала (рисунки 5.5, 5.6, 5.7).

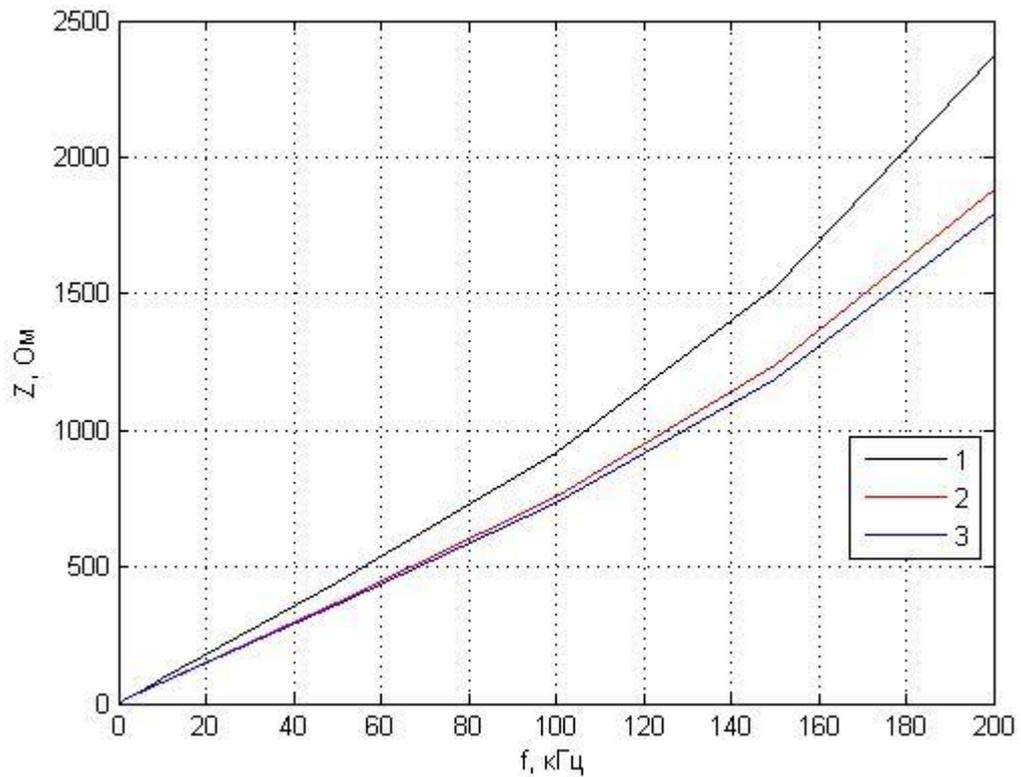


Рисунок 5.5 - Полное сопротивление ЧЗУ в зависимости от частоты.  
1 – ЧЗУ 1, 2 – ЧЗУ 2, 3 – ЧЗУ 3

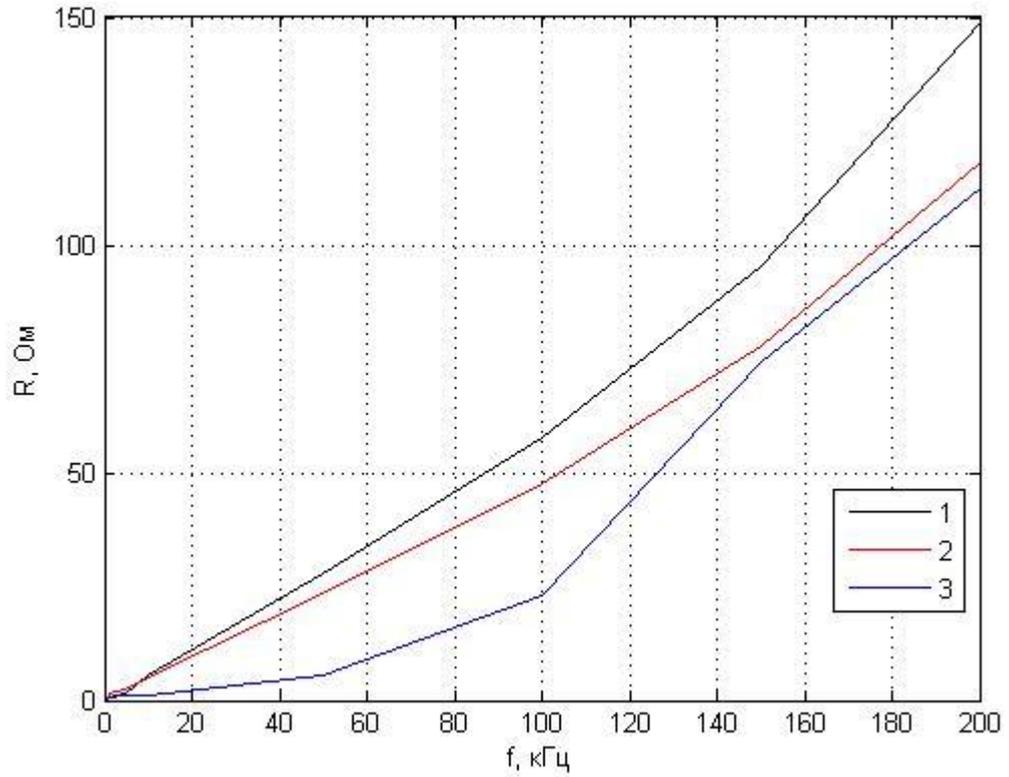


Рисунок 5.6 - Активное сопротивление ЧЗУ в зависимости от частоты.  
1 – ЧЗУ 1, 2 – ЧЗУ 2, 3 – ЧЗУ 3

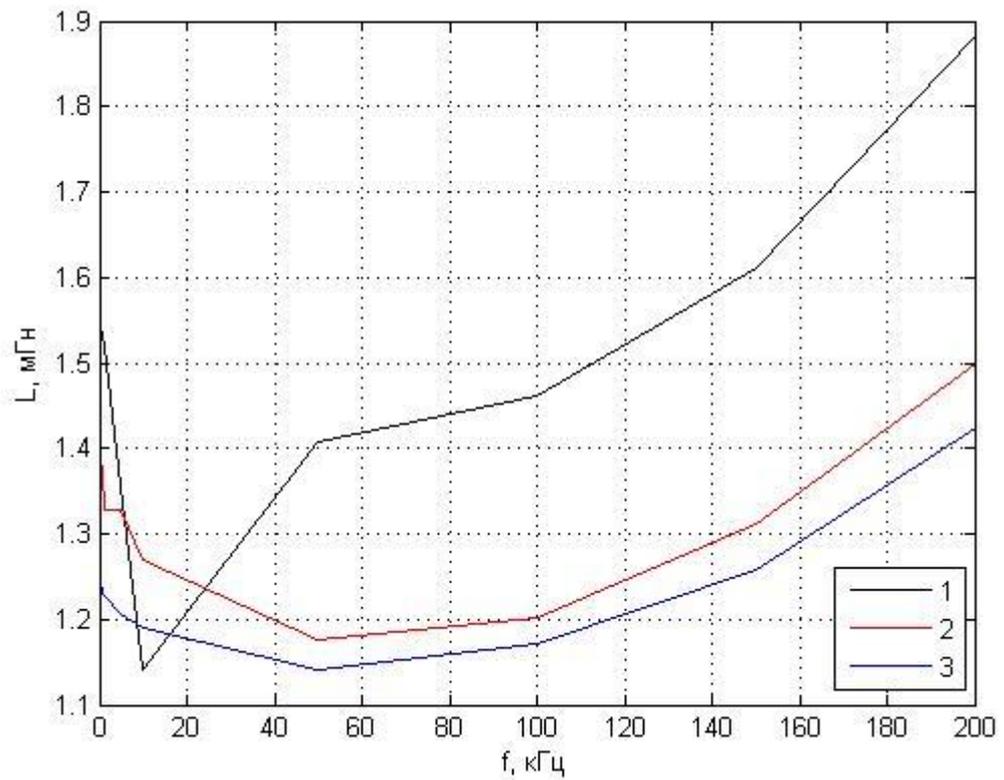


Рисунок 5.7 - Индуктивность ЧЗУ в зависимости от частоты.  
1 – ЧЗУ 1, 2 – ЧЗУ 2, 3 – ЧЗУ 3

На данных графиках хорошо видно, что наибольшие значения сопротивления и индуктивности на высоких частотах имеет образец №1, в котором частотозависимый провод уложен на основание тремя секциями по 12 витков. Разница значений полного сопротивления по сравнению с образцом №3, в котором провод уложен в пять секций, составляет порядка 500 Ом на частоте 200 кГц. Увеличивается также активное сопротивление и индуктивность образца №1. Это позволяет сделать вывод, что в дальнейшем при изготовлении ЧЗУ провод на основание должен быть уложен сплошной намоткой, что позволит не только увеличить сопротивление и индуктивность образца, но и уменьшить габариты и вес всей конструкции.

## 5.2 Испытания импульсным напряжением

Испытания импульсным напряжением проводилось с помощью схемы представленной на рисунке 5.8.

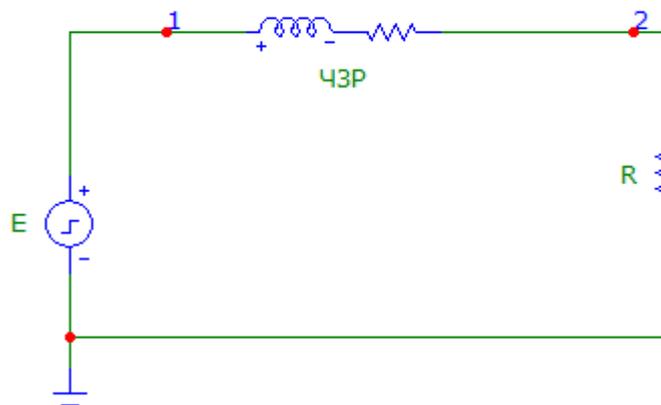


Рисунок 5.8 - Электрическая схема испытательной установки

В качестве источника напряжения использовался генератор импульсов SFG-2110 (производство GW instek), со следующими параметрами:

- выходное напряжение 10 В;
- внутреннее сопротивление источника 50 Ом.

Сформированные генератором прямоугольные импульсы частотой 1, 25, 50 и 100 кГц фиксировались осциллографом DL 750 (производство YOKOGAWA) в точках 1 и 2 (перед и после ЧЗР, соответственно).

Измерения проводились на трех ЧЗУ. Результаты приведены на рисунках 5.9-5.12.

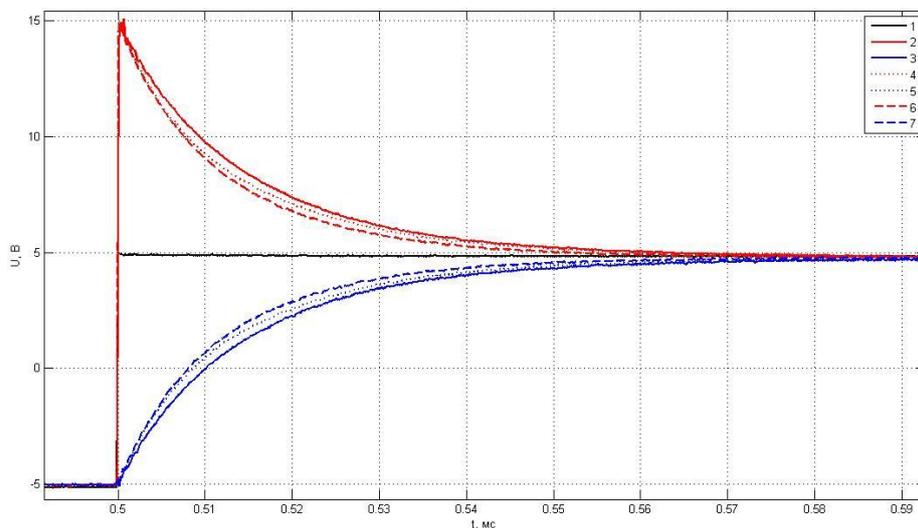


Рисунок 5.9 – прямоугольный импульс частотой 1 кГц, сформированный генератором, 2 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 1, 3 – напряжение в точке 2, после ЧЗУ 1, 4 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 2, 5 – напряжение в точке 2, после ЧЗУ 2, 6 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 3, 7- напряжение в точке 2, после ЧЗУ 3

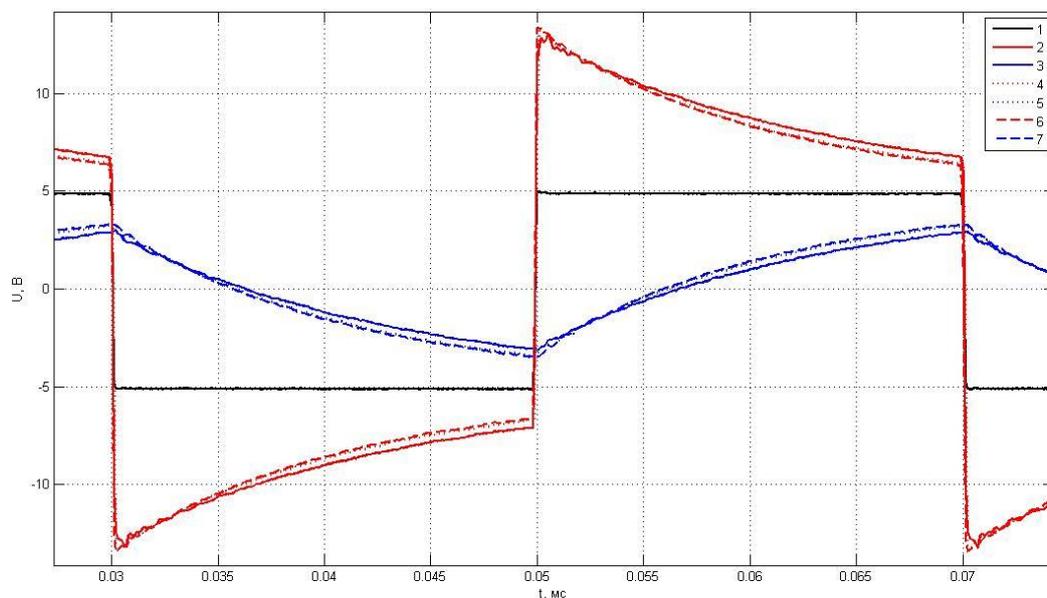


Рисунок 5.10 – прямоугольный импульс частотой 25 кГц, сформированный генератором, 2 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 1, 3 – напряжение в точке 2, после ЧЗУ 1, 4 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 2, 5 – напряжение в точке 2, после ЧЗУ 2, 6 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 3, 7- напряжение в точке 2, после ЧЗУ 3

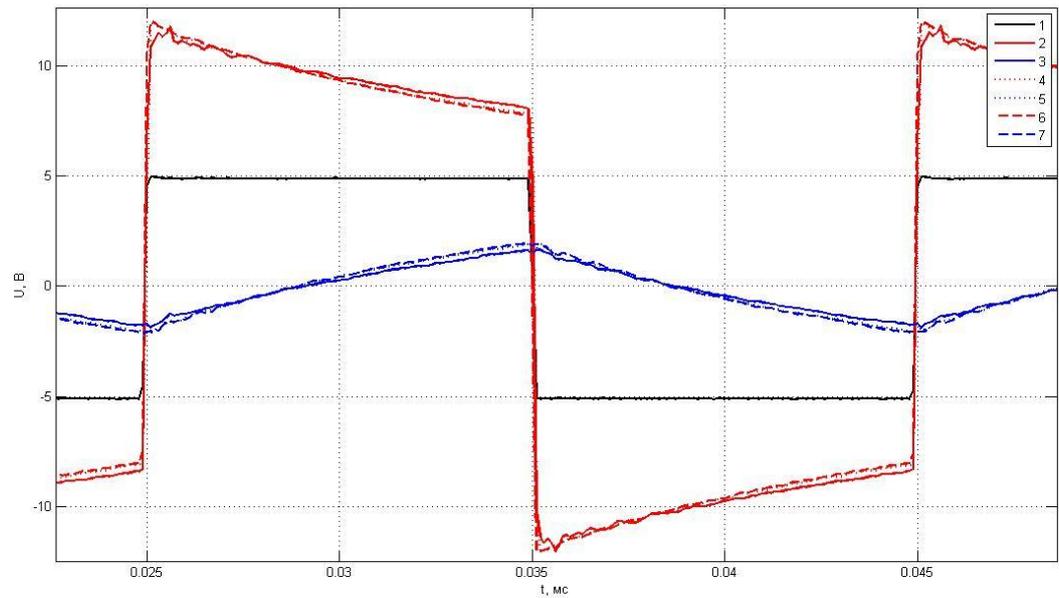


Рисунок 5.11 – прямоугольный импульс частотой 50 кГц, сформированный генератором, 2 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 1, 3 – напряжение в точке 2, после ЧЗУ 1, 4 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 2, 5 – напряжение в точке 2, после ЧЗУ 2, 6 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 3, 7- напряжение в точке 2, после ЧЗУ 3

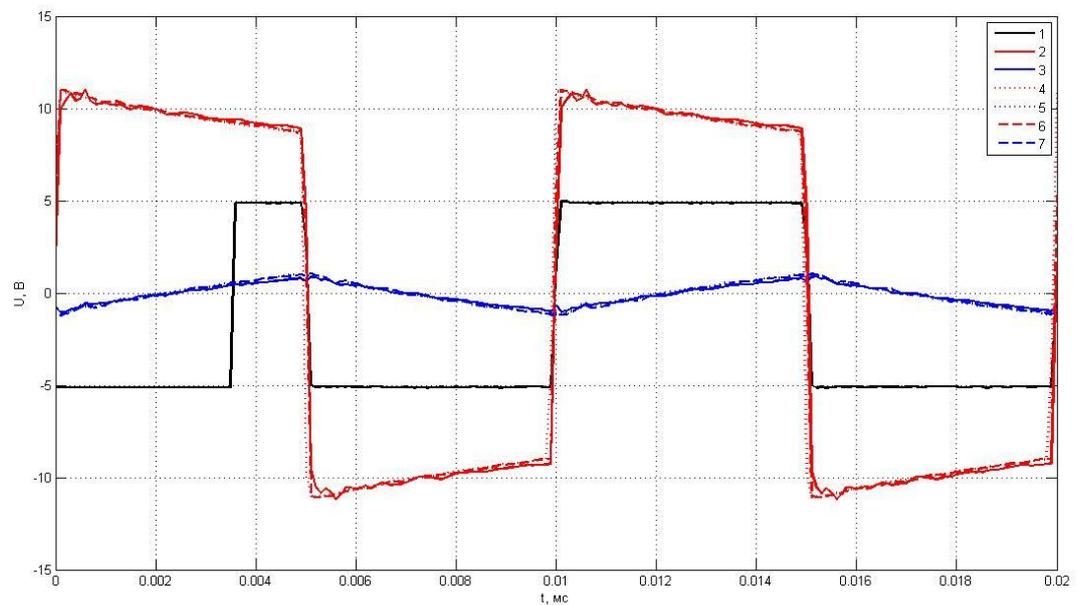


Рисунок 5.12 – прямоугольный импульс частотой 100 кГц, сформированный генератором, 2 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 1, 3 – напряжение в точке 2, после ЧЗУ 1, 4 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 2, 5 – напряжение в точке 2, после ЧЗУ 2, 6 – напряжение в точке 1, перед ЧЗУ 3, 7- напряжение в точке 2, после ЧЗУ 3

На графиках хорошо видно, что уже при прохождении через ЧЗУ импульса с частотой 1 кГц происходит заметное увеличение его длительности фронта. С ростом частоты импульса уменьшается не только его крутизна, но и амплитуда.

### 5.3 Определение характеристик ЧЗУ при проведении сильноточных измерений

Целью сильноточных испытаний являлось определение активного сопротивления образца и токов насыщения ЧЗУ на различных частотах. Образцом, на котором производились эксперименты, был трёхметровый отрезок частотозависимого провода, изготовленного для опытных образцов ЧЗР. Для проведения сильноточных измерений данного образца была использована схема, показанная на рисунке 5.13.[84].

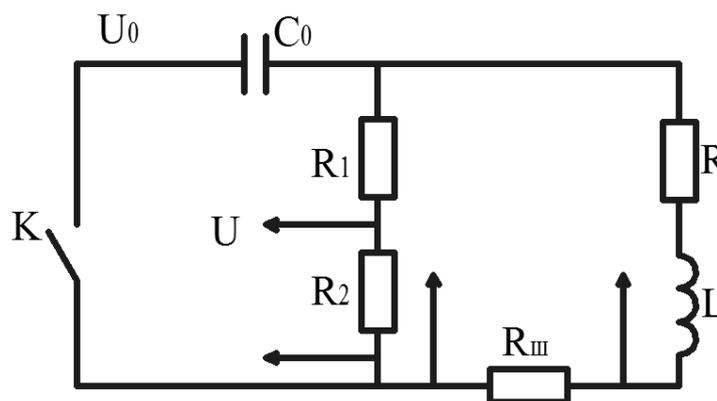


Рисунок 5.13 - Принципиальная электрическая схема сильноточных испытаний

Для создания импульса использовались конденсаторы К73 и генератор высокого напряжения на 10 кВ. В качестве ключа использовался неуправляемый искровой разрядник. Применение данных элементов позволило испытать образцы частотозависимого резистора длиной 3 метра на токах в несколько килоампер. Зарядное напряжение от генератора измерялось с помощью электростатического киловольтметра С196. Частота входного импульса изменялась подбором ёмкости конденсатора  $C_0$ . Сопротивление шунта  $R_{ш}=0,3\text{Ом}$ . Осциллограф марки RIGOL типа DS1022С запускался от сигнала делителя напряжения схемы включения.

Активное сопротивление образца частотозависимого провода можно определить через добротность  $Q$  колебательного контура, которым является схема измерения, представленная на рисунке 5.13. Известно, что

$$Q = \pi \frac{\tau}{T} \quad (5.3)$$

где  $\tau = \frac{1}{\gamma}$  – время затухания колебаний или интервал времени, в течении которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e \approx 2,7$  раз;

$$\gamma = \frac{R}{2L} - \text{коэффициент затухания.}$$

Значение максимального тока, проходящего через образец можно определить по пику первой гармоники входного импульса осциллограммы тока, снятой с сопротивления шунта  $R_{ш}$  (осциллограмма синего цвета на рисунке 5.14). Так как сопротивление шунта равно 0,3 Ом значение максимального тока через образец в данном случае составит 173 А.

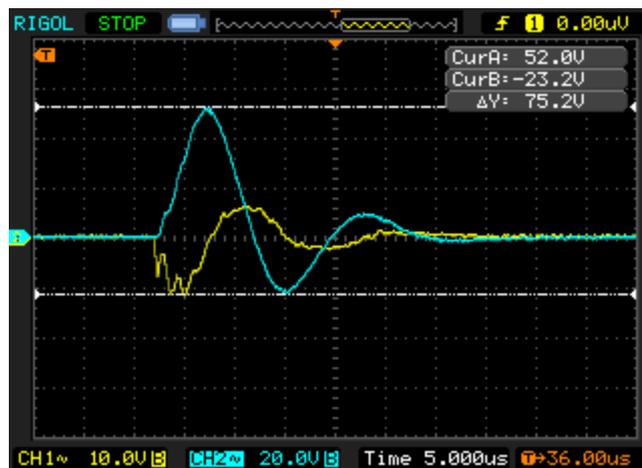


Рисунок 5.14 - Определение значений максимального тока через ЧЗР

Так же 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 (рисунок 5.15). По значению  $\tau$  и периоду колебаний  $T$  рассчитывались значения добротности колебательного контура  $Q$ .

Активное сопротивление контура, в данном случае состоящее из активных сопротивлений шунта и образца, можно определить из формулы:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.4)$$

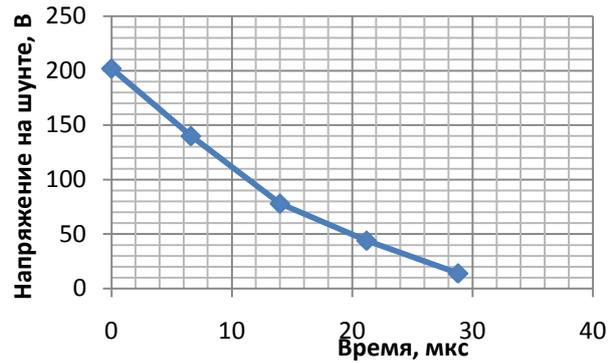
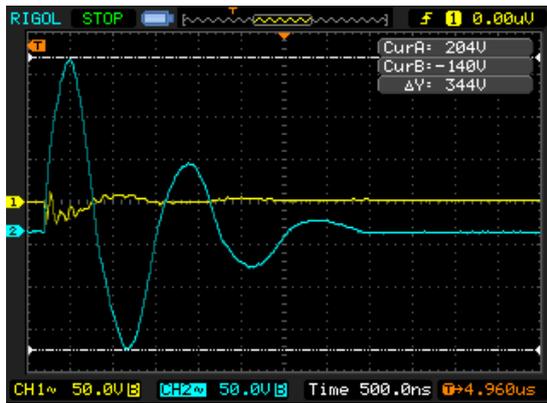
где  $R$  – активное сопротивление контура;

$C$  – ёмкость конденсатора  $C_0$ ;

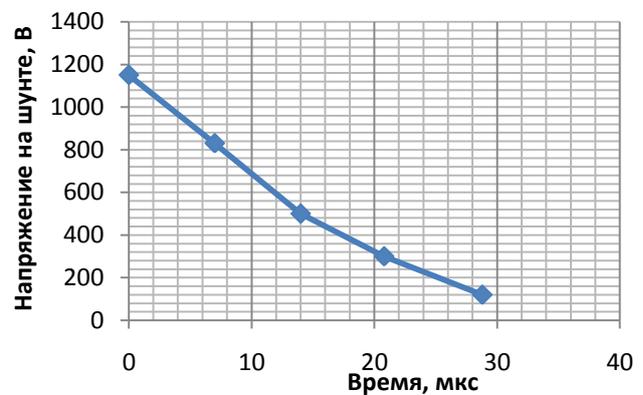
$L$  - индуктивность контура, рассчитанная по формуле Томсона:

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C} \quad (5.5)$$

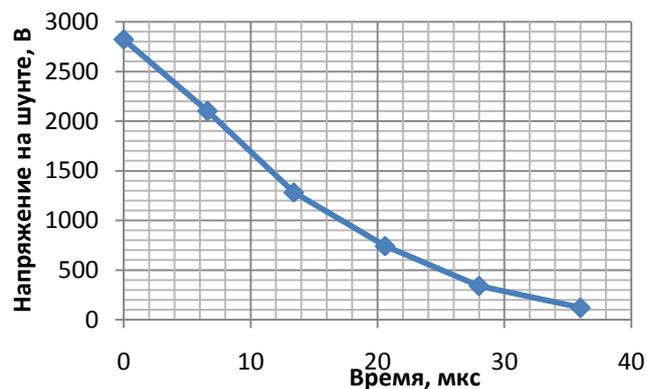
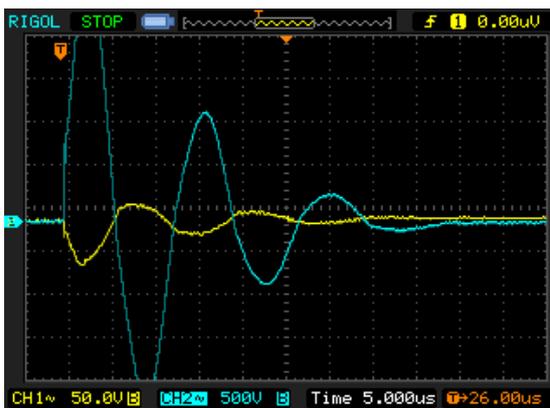
Измерения проводились при трёх конденсаторах  $C_0$  ёмкостью 0,1; 0,5 и 1 мкФ. При этом частота входного сигнала составляла 240 кГц, 102 кГц и 66кГц соответственно. Так на рисунке 5.15 представлены некоторые осциллограммы входных импульсов, графики затухания колебаний, а также расчёт значений тока и активного сопротивления образца при частоте входного сигнала 66 кГц ( $C_0 = 1$  мкФ).



$I = 673\text{A}$ ,  $L = 4.97 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $T = 14 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 14.2 \text{ мкс}$ ,  $Q = 3.18$ ,  $R_z = 0,401 \text{ Ом}$ ,  
 $R_{\Pi} = 0.133 \text{ Ом}$ .



$I = 3833 \text{ A}$ ,  $L = 4.975 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $T = 14 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 16 \text{ мкс}$ ,  $Q = 3.59$ ,  $R_z = 0.621 \text{ Ом}$ ,  
 $R_{\Pi} = 0.0107 \text{ Ом}$ .



$I = 9266\text{A}$ ,  $L = 4.555 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $T = 13.4 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 16.5 \text{ мкс}$ ,  $Q = 3.866$ ,  
 $R_z = 0.552 \text{ Ом}$ ,  $R_{\Pi} = 0.084 \text{ Ом}$ .

Рисунок 5.15 - Определение активного сопротивления образца при частоте 66 кГц

Расчётные значения погонного активного сопротивления  $R_{\text{п}}$  и значения силы тока в ЧЗУ приведены в таблице 5.4, график их зависимости показан на рисунке 5.16.

Таблица 5.4 - Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ при частоте входного сигнала 66 кГц

I (А)	114,6	162,6	173	266	687	3833	9266
R(Ом)	0,376	0,334	0,3	0,237	0,133	0,107	0,084

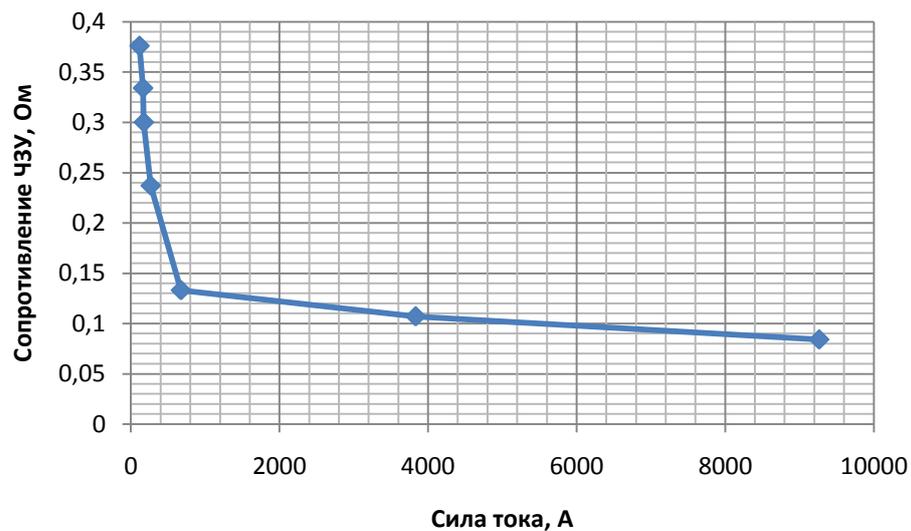
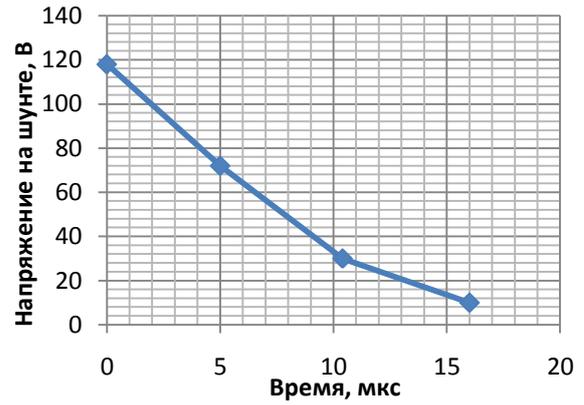
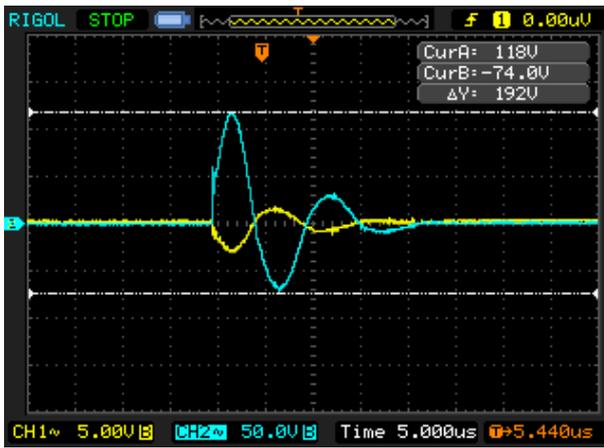
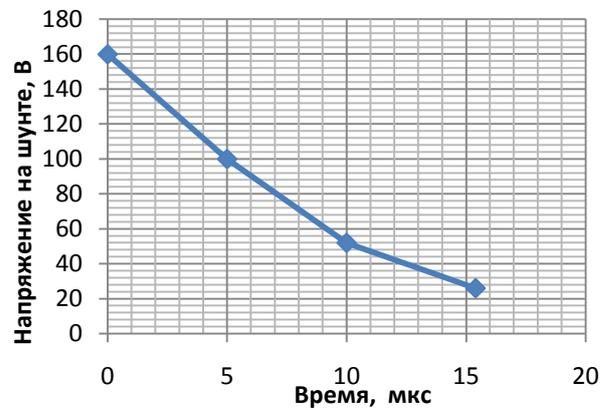
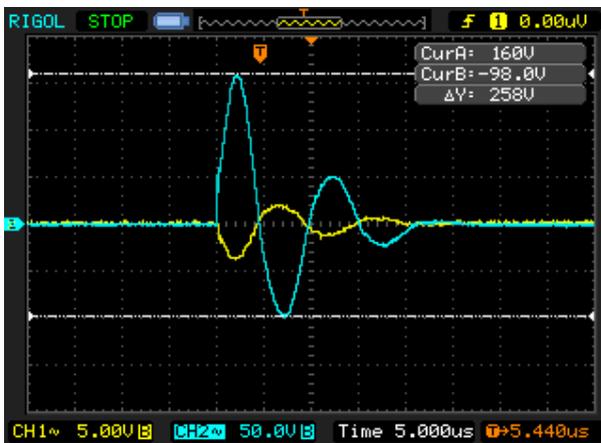


Рисунок 5.16 - Зависимость активного сопротивления ЧЗУ от проходящего тока на частоте 66 кГц

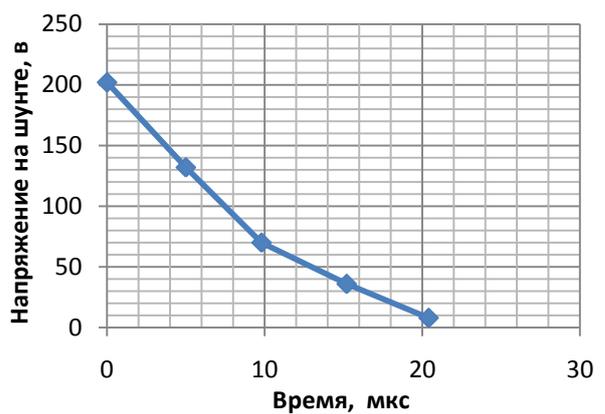
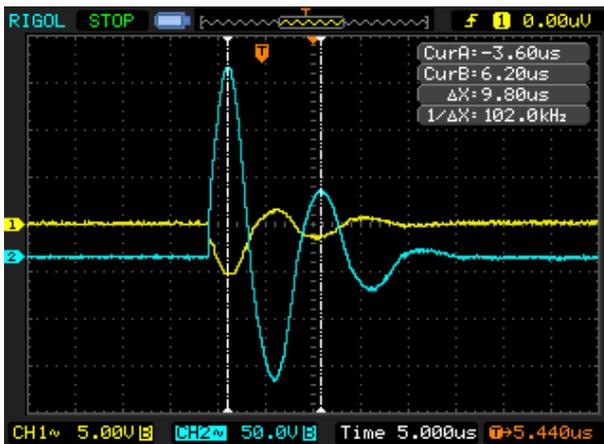
Такие же расчёты были проведены для входных сигналов частотой 102 и 240 кГц. Осциллограммы входных импульсов, графики затухания колебаний, а также расчёт значений тока и активного сопротивления образца на этих частотах приведены на рисунках 5.17 и 5.18 соответственно.



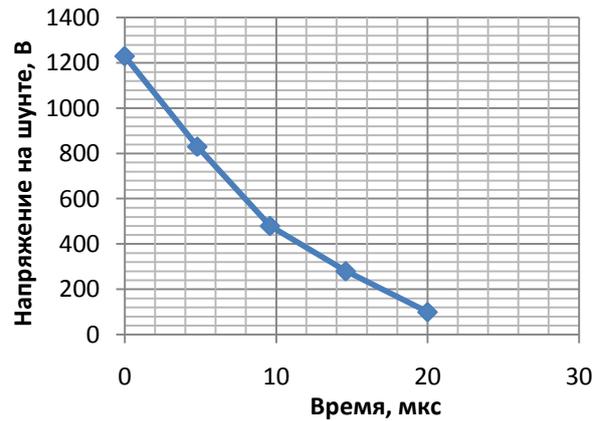
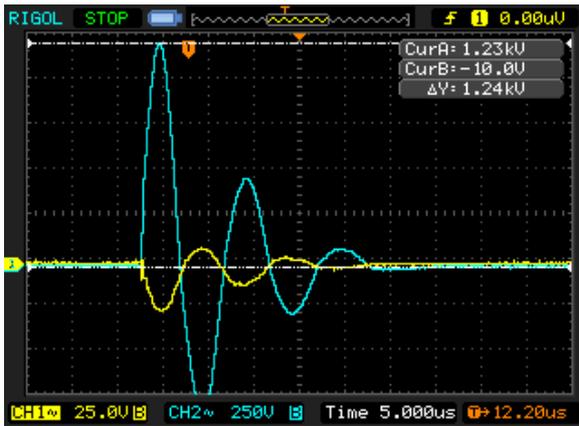
$I = 393\text{A}$ ,  $L = 5,49 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $T = 10,4 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 8,5 \text{ мкс}$ ,  $Q = 2,5663$ ,  $R_z = 0,991 \text{ Ом}$ ,  
 $R_{\Pi} = 0,33 \text{ Ом}$



$I = 533\text{A}$ ,  $L = 5,076 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $T = 10 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 9,1 \text{ мкс}$ ,  $Q = 2,8574$ ,  $R_z = 0,814$ ;  
 $R_{\Pi} = 0,271 \text{ Ом}$ .



$I = 673\text{A}$ ,  $L = 4,87 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $\text{мкФ}$ ,  $T = 9,8 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 9,5 \text{ мкс}$ ,  $Q = 3,043$ ,  $R_z = 0,72$ ;  
 $R_{\Pi} = 0,24, \text{ Ом}$ .



$I = 4100\text{A}$ ,  $L = 4,68 \cdot 10^{-6}\text{ Гн}$ ,  $T = 9,6\text{ мкс}$ ,  $\tau = 10,3\text{ мкс}$ ,  $Q = 3,368$ ,  $R_z = 0,608$ ;  
 $R_{\Pi} = 0,203\text{ Ом}$

Рисунок 5.17 - Определение активного сопротивления образца при частоте 102 кГц

Расчётные значения силы тока и активного сопротивления при частоте 102 кГц сведены в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 - Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ при частоте входного сигнала 102 кГц

I (A)	393	533	673	4100
R(Ом)	0,33	0,271	0,24	0,203

График зависимости активного сопротивления от проходящего тока на данной частоте приведен на рисунке 5.19.

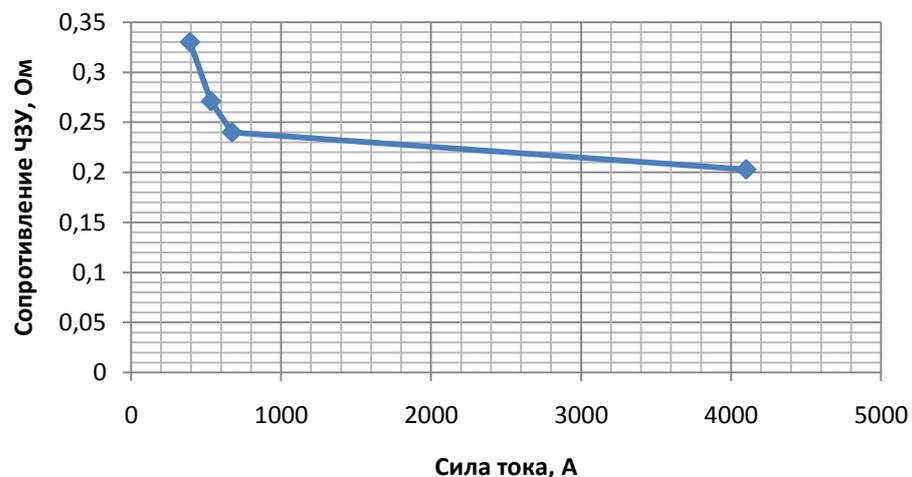
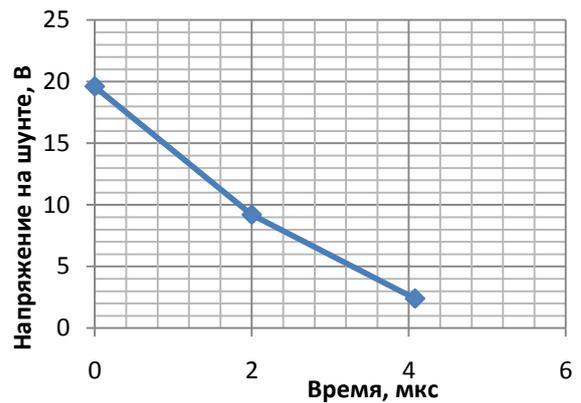
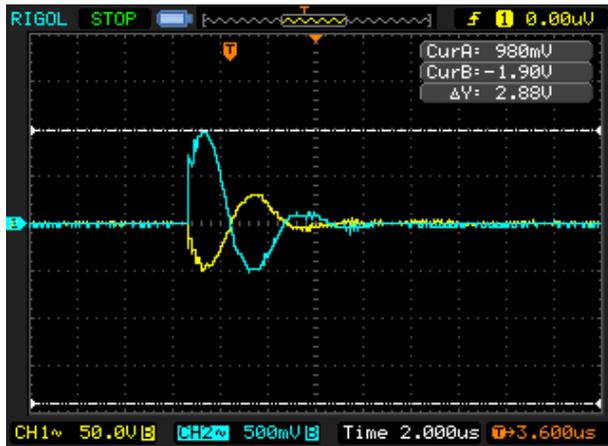
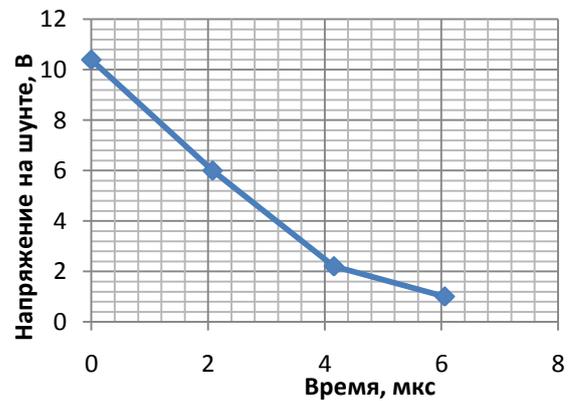
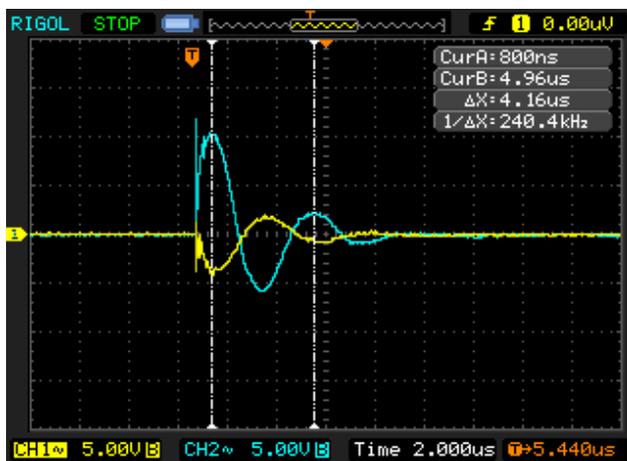


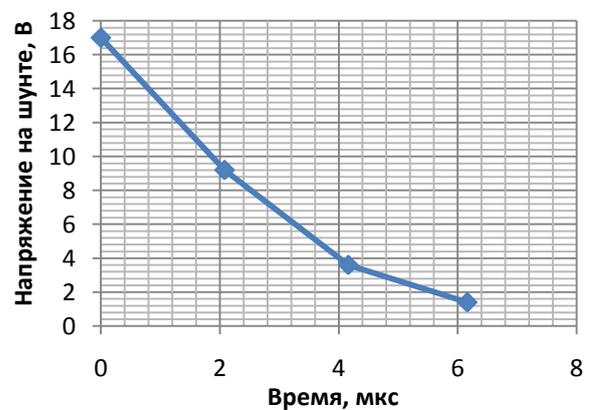
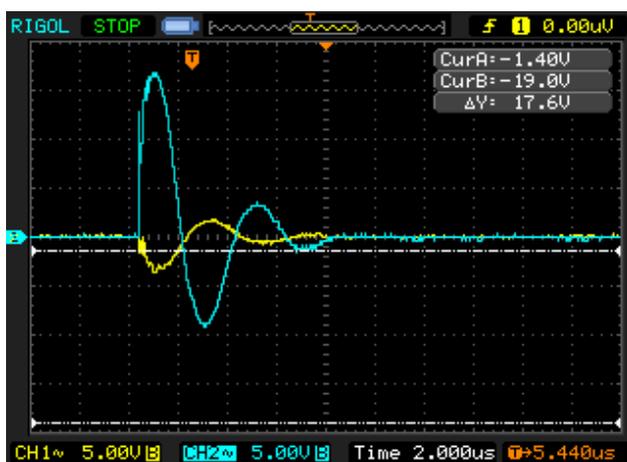
Рисунок 5.19 - Зависимость активного сопротивления ЧЗУ от проходящего тока на частоте 102 кГц



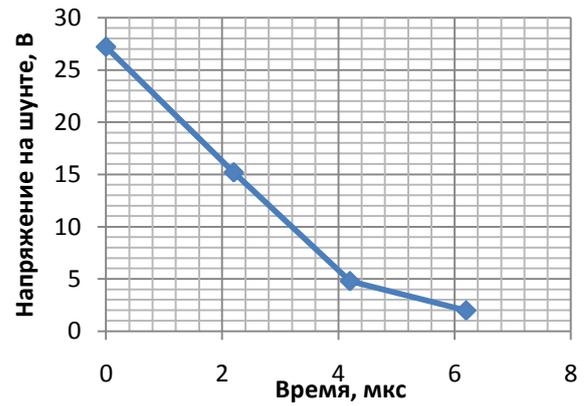
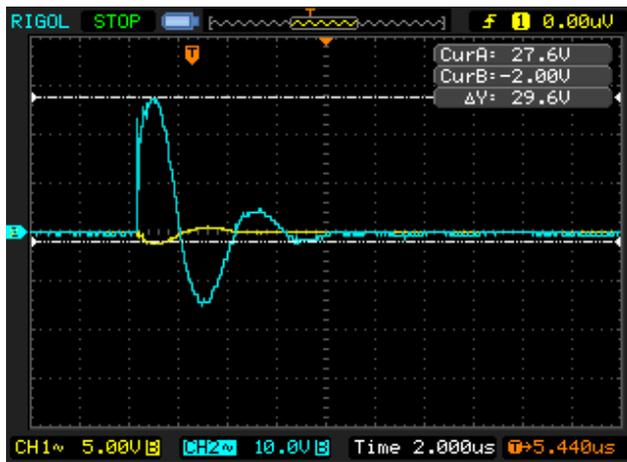
$I = 32.6 \text{ A}$ ,  $L = 4.47 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $T = 4, 2 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 3.1 \text{ мкс}$ ,  $Q = 2,317$ ,  $R_z = 2.587 \text{ Ом}$ ;  
 $R_{\Pi} = 0.862 \text{ Ом}$ .



$I = 34.6 \text{ A}$ ,  $L = 4.39 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $T = 4.16 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 3.4 \text{ мкс}$ ,  $Q = 2.566$ ,  $R_z = 2.58 \text{ Ом}$ ,  
 $R_{\Pi} = 0,860 \text{ Ом}$



$I = 56 \text{ A}$ ,  $L = 4.39 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ,  $T = 4.16 \text{ мкс}$ ,  $\tau = 3.2 \text{ мкс}$ ,  $Q = 2.419$ ,  $R_z = 2.43 \text{ Ом}$ ;  
 $R_{\Pi} = 0.843 \text{ Ом}$ .



$$I = 92\text{A}, L = 4.39 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, T = 4.16 \text{ мкс}, \tau = 3.1 \text{ мкс}, Q = 2.339,$$

$$R_z = 2.53 \text{ Ом}; R_{\Pi} = 0,810 \text{ Ом}.$$

Рисунок 5.18 - Определение активного сопротивления образца при частоте 240 кГц

Расчётные значения силы тока и активного сопротивления образца при частоте входного сигнала 240 кГц приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 - Значения силы тока и активного сопротивления ЧЗУ при частоте входного сигнала 240 кГц

I (A)	32,6	34,6	56	92	302	3500
R(Ом)	0,862	0,860	0,843	0,810	0,779	0,75

График зависимости активного сопротивления образца от проходящего тока показан на рисунке 5.20

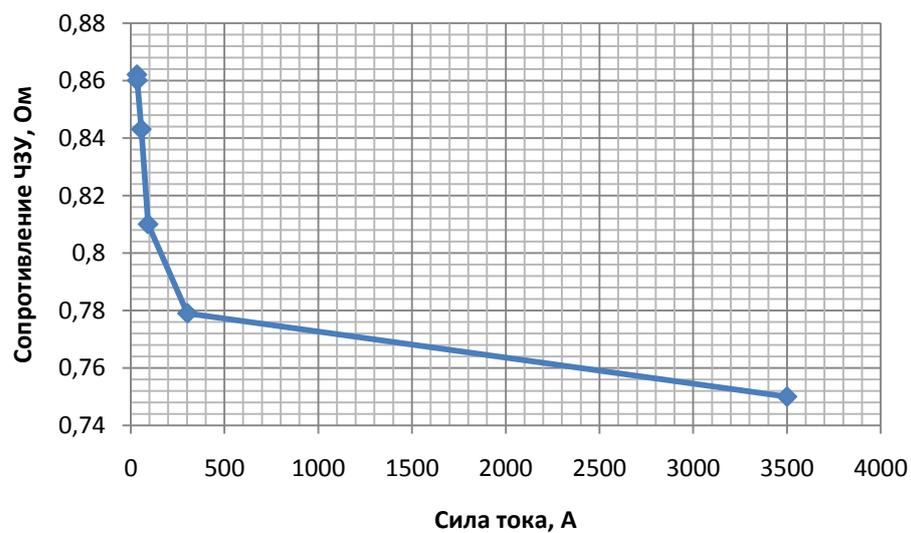


Рисунок 5.20 - Зависимость активного сопротивления ЧЗУ от проходящего тока на частоте 240 кГц

По графикам на рисунках 5.16, 5.19 и 5.20 с помощью аппроксимации можно проследить зависимость значений активного сопротивления образца при прохождении по нему равных токов на различных частотах. Так, например, при прохождении тока 300 А сопротивление образца на частотах 66, 102 и 240 кГц будет равно 0,22 Ом, 0,37 Ом и 0,78 Ом соответственно, то есть изменяться в соответствии с графиком, приведённым на рисунке 5.21.

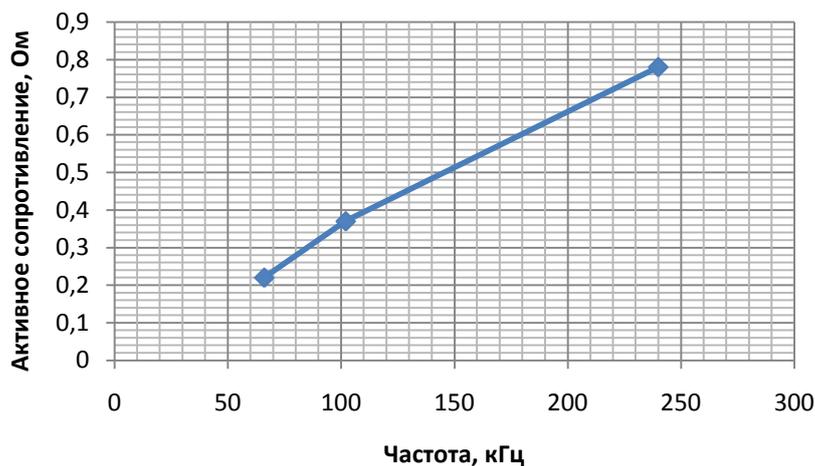


Рисунок 5.21 - Зависимость активного сопротивления образца от частоты при токе 300 А

Кроме этого, графики зависимости сопротивления ЧЗУ от проходящего тока позволяют хотя бы приблизительно определить значение тока глубокого насыщения при различной частоте входного сигнала. График данной зависимости приведен на рисунке 5.22.

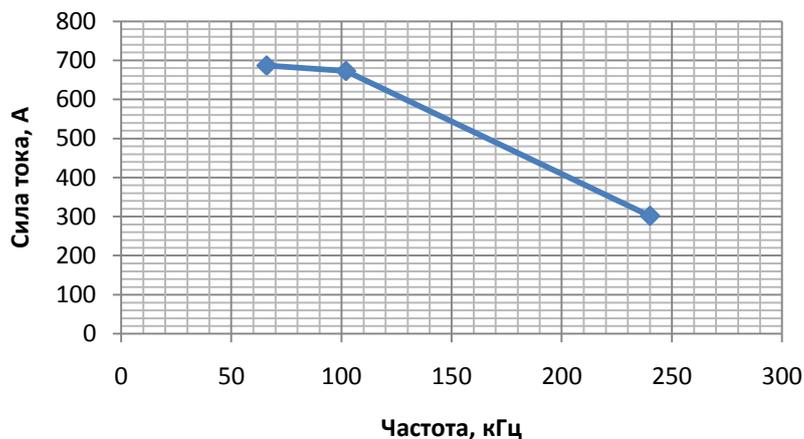


Рисунок 5.22 - Зависимость значений тока глубокого насыщения от частоты входного сигнала

Хорошо видно, что значение силы тока насыщения уменьшается с ростом частоты входного сигнала. Данная зависимость подтверждается результатами сильноточных измерений 28-лучевого резистора (рисунок 3.4) с накладкой из ленты 5БДСР толщиной 0,075 мм при частоте входного импульса 378 кГц, 160 кГц и 108 кГц (таблица 5.7).

Таблица 5.7 - Зависимость сопротивления 28-лучевого ЧЗУ от силы тока

$C_0 = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $f = 378,8 \text{ кГц}$

I (А)	R (Ом)
596	0,679
600	0,665
693	0,653
3500	0,63
7400	0,61

$C_0 = 0,5 \text{ мкФ}$ ,  $f = 160,3 \text{ кГц}$

I (А)	R (Ом)
546	0,293
640	0,245
660	0,219
686	0,209
861	0,191
3100	0,182
8200	0,164

$C_0 = 1 \text{ мкФ}$ ,  $f = 108,7 \text{ кГц}$

I (А)	R (Ом)
400	0,188
673	0,113
793	0,09
853	0,076
886	0,061
2733	0,052
8466	0,025

Графики зависимости сопротивления 28-лучевого ЧЗУ от частоты показаны на рисунках 5.23- 5.25

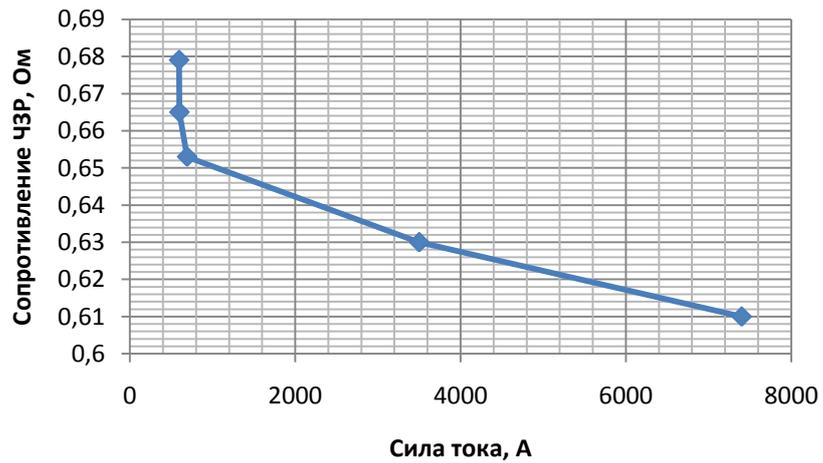


Рисунок 5.23 - Зависимость активного сопротивления 28-лучевого ЧЗУ от проходящего тока на частоте 378,8 кГц

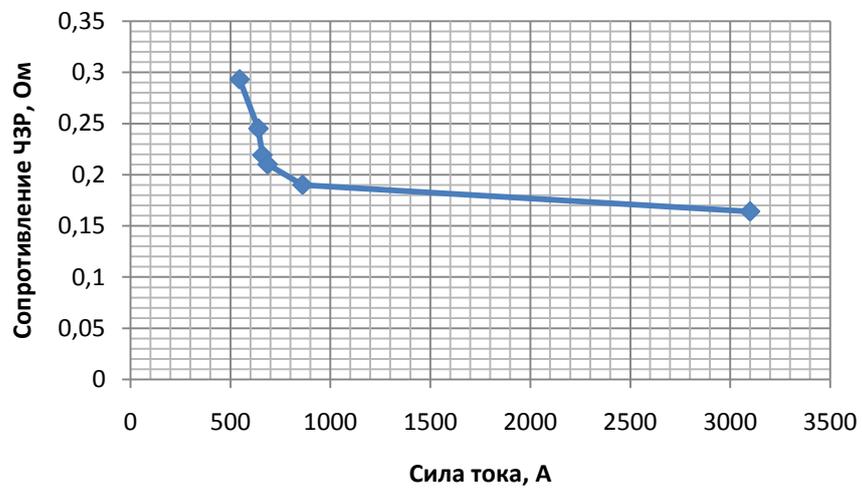


Рисунок 5.24 - Зависимость активного сопротивления 28-лучевого ЧЗУ от проходящего тока на частоте 160,3 кГц

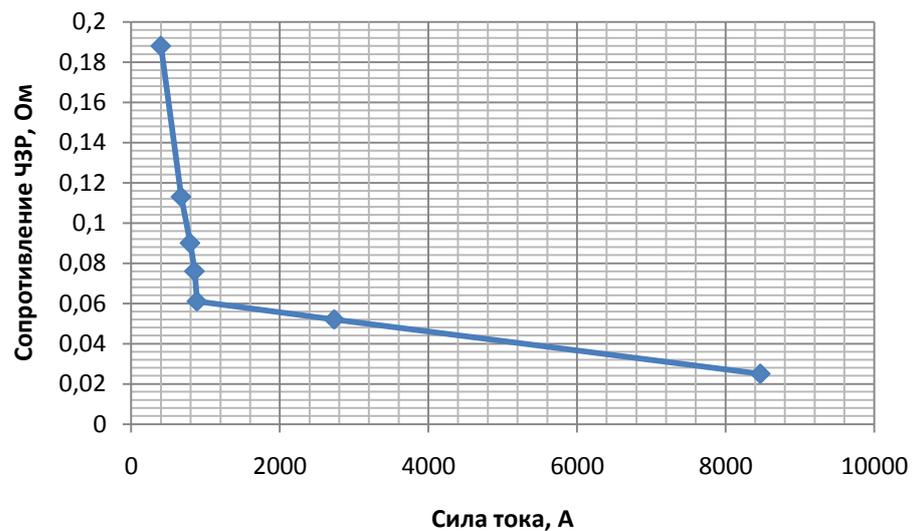


Рисунок 5.25 - Зависимость активного сопротивления 28-лучевого ЧЗУ от проходящего тока на частоте 108,7 кГц

Зависимость значений тока глубоко насыщения 28-лучевого частотозависимого устройства от частоты входного сигнала представлена на рисунке 5.26.

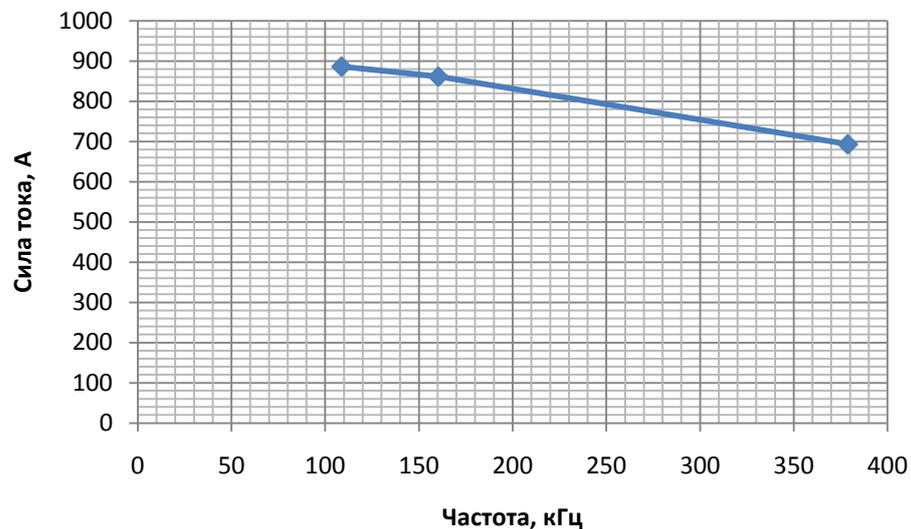


Рисунок 5.26 - Зависимость значений тока глубоко насыщения от частоты входного сигнала

#### 5.4 Определение магнитной проницаемости ленты 5БДСР

Изделия из ленты сплава 5БДСР нуждаются в обязательной термомагнитной обработке при температурах 520- 550 С в воздушной атмосфере или в среде инертного газа. Без термообработки изделия не применяются, т.к. магнитные свойства достигаются только после термообработки. Поэтому, чтобы удостовериться в правильности компьютерных расчётов, в ходе работы возникла необходимость уточнить уровень магнитной проницаемости ленты. Рассчитать магнитную проницаемость материала можно с помощью петли гистерезиса.

Для получения петли гистерезиса ленты на экране осциллографа и измерения её основных характеристик применялась установка, схематически изображенная на рисунке 5.27 [95].

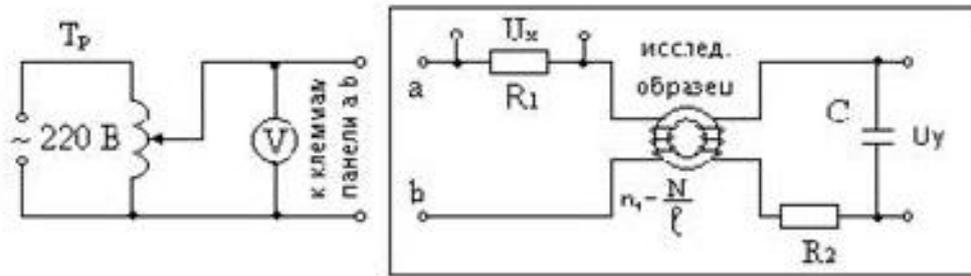


Рисунок 5.27 - Принципиальная схема установки для получения петли гистерезиса на экране осциллографа

Основными элементами установки являются тороид из аморфной ленты 5БДСР с первичными и вторичными цепями и осциллограф марки RIGOL DS1022C. На горизонтальные отклоняющие пластины X трубки осциллограф подается напряжение  $U_x$  пропорциональное  $H$ , а на вертикальные пластины Y – напряжение  $U_y$ , пропорциональное  $B$ .

Первичная цепь схемы включала в себя малоиндуктивное сопротивление 30 Ом и первичную обмотку из  $N_1 = 50$  витков медного провода. Вторичная цепь состояла из обмотки  $N_2 = 300$  витков и простейшей интегрирующей цепочки RC. Схема выполняет свое назначение, если сопротивление  $R$  значительно превышает ёмкостное сопротивление конденсатора  $X_C$ . При выполнении этого условия ток в цепи пропорционален входному напряжению, а напряжение на ёмкости  $C$  будет равно:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt \quad (5.6)$$

Второе необходимое условие – характерное время процесса, то есть его период, должен быть меньше постоянной времени интегрирующей цепочки  $\tau = RC$ .

Напряженность поля, магнитная индукция в сердечнике и магнитная проницаемость материала рассчитывались по формулам:

$$H = \frac{N_1 \cdot U_x}{R_1 \cdot l \cdot 2}; \quad (5.7)$$

$$B = \frac{R_2 \cdot C \cdot U_Y}{N_2 \cdot S \cdot 2}; \quad (5.8)$$

$$B = \mu \mu_0 H \quad (5.9)$$

где  $l$  – длина магнитной линии,  $S$  – сечение магнитопровода.

При  $R_1 = 30$  Ом,  $R_2 = 30$  кОм,  $C = 2$  мкФ,  $N_1 = 50$  витков,  $N_2 = 300$  витков,  $l = 562$  мм и  $S = 450$  мм<sup>2</sup> по осциллограммам (рисунок 5.28) рассчитывались значения напряженности поля и магнитная индукция сердечника из ленты 5БДСР. Затем по формуле 5.9 находились значения её магнитной проницаемости.

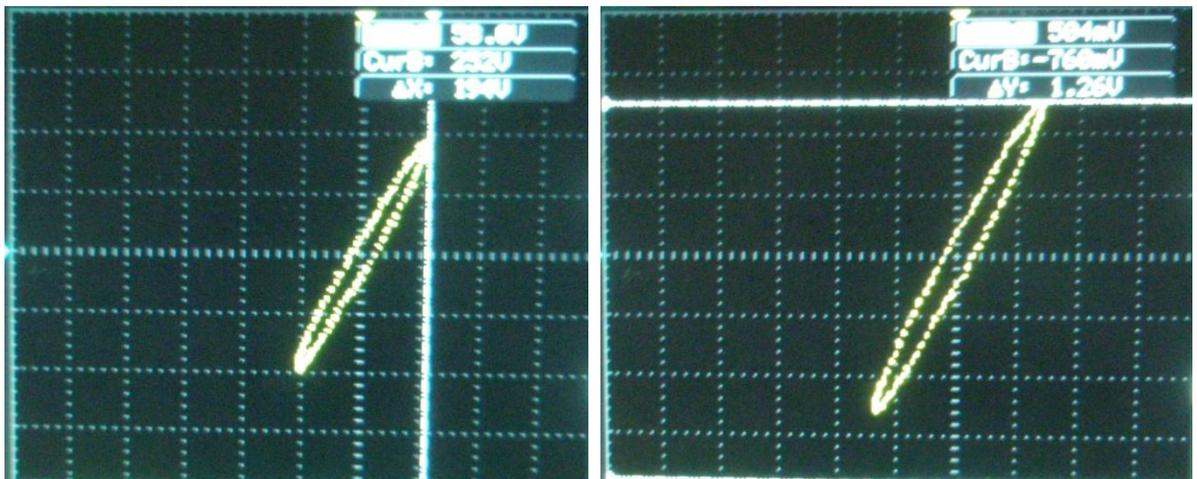


Рисунок 5.28 - Осциллограммы для расчёта  $H$  и  $B$

Значения магнитной проницаемости ленты 5БДСР, рассчитанные при различных входных напряжениях, приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 - Магнитная проницаемость аморфной ленты 5БДСР

$U_x$ (В)	$H$ (А/м)	$U_y$ (В)	$B$ (Тл)	$\mu$
26	38	0,136	0,029	626
36	52,9	0,192	0,042	632
46	67,7	0,3	0,066	707
63	92,6	0,4	0,088	756
77	113,2	0,52	0,11	804
184	270	1,5	0,33	973

Подставляя рассчитанные значения  $\mu$  в компьютерную программу, рассчитывались значения погонного сопротивления при данной магнитной проницаемости на частотах, при которых проводились сильноточные измерения.

Так, например, в таблице таблица 5.9 представлены погонные значения сопротивления в зависимости от  $\mu$  на частотах 240, 102 и 66 кГц.

**Таблица 5.9 - Зависимость активного сопротивления ЧЗУ от магнитной проницаемости накладки из ленты 5БДСР**

$\mu$	R (Ом) при F=240 кГц	R (Ом) при F=102 кГц	R (Ом) при F=66 кГц
626	0.786	0.463	0.355
632	0.789	0.464	0.357
707	0.822	0.486	0.374
756	0.842	0.5	0.385
804	0.862	0.512	0.396
973	0.926	0.554	0.43

Сравнивая значения сопротивления, полученные по программным расчётам со значения сопротивления, полученных в результате сильноточных измерений на данной частоте, можно определить значение магнитной проницаемости ленты 5БДСР. Так, на частоте 240 кГц сопротивление образца при насыщении составляло 0,78 Ом, Следовательно, значение магнитной проницаемости  $\mu$  ленты приблизительно равно 630.

Кроме этого, сравнение значений сопротивления из таблицы 5.9 с результатами измерений показывает их совпадение (таблица 5.10)

**Таблица 5.10 - Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами измерений**

F (кГц)	66	102	240
Компьютерное моделирование R (Ом)	0.35	0.46	0.78
Сильноточные измерения R (Ом)	0,3	0,37	0,78

## 5.5 Выводы по главе 5

1. Сравнение результатов высокоточных измерений и измерений сопротивления ЧЗУ методом амперметра-вольтметра при низковольтных испытаниях позволяют говорить о совпадении значений сопротивления на близких частотах и сделать вывод об их реальности.

2. Уточнение значения магнитной проницаемости ленты 5БДСР позволяет сделать вывод о правильности компьютерных расчётов значений сопротивления ЧЗУ на различных частотах и о совпадении их со значениями сопротивления, полученного в результате измерений.

## Заключение

В ходе диссертационной работы по разработке частотозависимого устройства для подавления высокочастотных перенапряжений получены следующие результаты:

- проведены теоретические и экспериментальные исследования по выбору эффективных электрических и конструктивных параметров частотозависимого устройства;

- проведено математическое и физическое моделирование реальных конструкций отдельных модулей частотозависимого устройства;

- проанализирована эффективность снижения высокочастотной составляющей грозовых перенапряжений при варьировании сопротивления и индуктивности частотозависимого устройства для различных типов подстанций напряжением 110 кВ;

- разработана конструкция частотозависимого устройства и определены его массогабаритные показатели;

- сформулированы технические требования к частотозависимому устройству и оценены его стоимостные показатели;

- разработано и испытано частотозависимое устройство подавления грозовых перенапряжений для Ноябрьских сетей ОАО «Тюменьэнерго»;

- проведены высоковольтные испытания опытного образца и его частей;

- опытные образцы частотозависимого устройства установлены на ПС «Сугмутская» ОАО «Тюменьэнерго» (рисунок 6.1)



Рисунок 6.1 - ЧЗУ на портале подстанции «Сугмутская»

## Библиографический список использованной литературы

1. Костенко М.В., Ефимов Б.В., Зархи И.М., Гумерова Н.И. Анализ надежности грозозащиты подстанций. -Л.: «Наука», 1981.-128 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Издание15-е.М.:Энергоатомиздат,1996.
3. Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник/В. И.Кравченко.М.:Радиоисвязь,1991.264с.
4. Б а з е л я н Э. М. Физические и инженерные основы молниезащиты / Э. М. Базелян, Б. Н. Горин, В. И. Левитов. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 224 с.
5. Базелян Э. М. Физика молнии и молниезащиты / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзер. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
6. Гаранин А. Е. Перенапряжения на аппаратуре СЦБ в грозовой сезон / А. Е. Гаранин, В. Е. Митрохин // Наука и образование транспорту: Материалы III Всероссийской научно-практич. конф. (Самара - Пенза, 2010) / Самарский гос. ун-т путей сообщения. Самара, 2010. С. 62-64.
7. Гаранин А. Е. Вероятность отказов аппаратуры автоблокировки в грозовой сезон / А. Е. Гаранин, В. Е. Митрохин // Безопасность движения поездов: Труды Одиннадцатой научно-практич. конф. / Московский гос. ун-т путей сообщения (МИИТ). М., 2010. С. УШ-5, УП1-6.
8. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И. А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. -Л.: «Наука», Ленинградское отд-ние, 1988
9. Кадомская К.П., Борисов Е.А. О моделировании волн тока молнии при исследовании грозозащиты электроэнергетических объектов//Сборник научных трудов НГТУ.-2003.-№2(32).-с.89-98.
10. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ. -М.: Изд-во НТК "Электропроект", 2000.

11. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Защита оборудования подстанций 110-750 кВ от перенапряжений//Новости Электротехники. -2004. -№6(30). -с.42-45.
12. Аронов М.А., Аношин О.А., Кондратов О.И., Лопухова Т.В. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Методическое и справочное пособие. Под ред. М.А. Аронова. -М.: Изд-во "Знак", 2001. -240 с.
13. Овсянников А. Г., Малышева Е.П. Повышение грозоупорности сетей 6-10 кВ // Линии электропередачи – 2006: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: Сборник докладов Второй Российской научно-практической конференции с международным участием
14. Александров Г.Н. Ограничение перенапряжений в электрических сетях. — СПб.: Центр подготовки кадров СЗФ АО "ГВЦ Энергетики", 2003. -188 с.
15. Гумерова Н.И., Грязнов И.Ю., Смирнов О.В. Грозовые токи в ОПН//Сборник докладов 8-й научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности «ЭМС-2004». -СПб.,2004.-с.60-65.
16. Лысков Ю.И., Антонова Н.П., Максимов В.М., Демина О.Ю. Проблемы применения нелинейных ограничителей перенапряжений 110-750 кВ//Электрические станции. -1988. -№ 9. -с.43-47.
17. Иманов Г.М., Таджибаев А.И., Халилов Ф.Х. Анализ опыта эксплуатации ограничителей перенапряжений 110 кВ и выше в сетях РАО "ЕЭС России//Промышленная энергетика. -1998. -№ 1. -с. 11-14.
18. О.Гумерова Н.И. Проектирование грозозащиты ОРУ станций и • подстанций//Сборник докладов 8-й научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности «ЭМС-2004». -СПб., 2004. -с.69-74.
- 19.Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Подвесные ОПН для защиты изоляции ВЛЮэнергетик. -2005. -№3. -с.21-25.
20. Furukawa S., Usuda O., Isozaki T. Development and application of lightning arresters for transmission lines//IEEE Transactions on Power Delivery. -1989. -№4. - Vol.4, -pp.2121 -2127.

21. Уменьшение энергии, поглощаемой ОПН при воздействии грозового импульса. В сб. докладов Всерос. Сем. «Выбор и эксплуатация ОПН в эл. сетях 6-35 кВ, Москва, РАО ЕЭС, 15-18 мая 2001 г.
22. Дмитриев М.В. Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35-750 кВ и защита от них // Санкт-Петербург. 2006.
23. Малышева Е.П., Овсянников А. Г. Грозовые перенапряжения в контактной сети железных дорог // Сб. докладов 1-й Российской конференции по молниезащите, 26-30 ноября, 2007, Новосибирск, с.57-62
24. 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.
25. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения // Наука. Ленинград. 1988. С. 104-107
26. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике, М., «Энергия», 1968. С.8
27. Дульзон А.А. Исследования характеристик грозовой деятельности и параметров молнии применительно к грозозащите воздушных линий электропередачи – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук в форме научного доклада. – Новосибирск 1993
28. М.Е. Гольдштейн, Ю.В. Коровин, А.В. Прокудин. Атмосферные и коммутационные перенапряжения в электрических системах: учебное пособие – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010.
29. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей Томск: Изд-во Томского университета, 1975
30. Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении Томск: Изд-во НТЛ, 2005
31. Басманов В.Г. Изоляция и перенапряжение: Учебное пособие. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2005.

32. Лавринович В.А., Мытников А.В. Научно-исследовательской работа (НИР) по разработке программно-аппаратного комплекса диагностики активных частей трансформаторов (диагностического комплекса контроля состояния обмоток трансформаторов) на тему: «Разработка программно-аппаратного комплекса диагностики активных частей трансформаторов»

33. Хренников А.Ю., Петров А.С., Цыгикало Г.В., Щербаков В.В., Языков С.А. Системы мониторинга и опыт диагностики состояния электротехнического оборудования в ОАО «Самараэнерго»//Электро – №2– 2004.

34. Львов М.Ю, Львов Ю.Н., Дементьев Ю.А., Антипов К.М., Сурба А.С., Шейко П.А., Неклепаев Б.Н., Шифрин Л.Н., Кассихин С.Д., Славинский А.З., Сипилкин К.Г. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей. – Электрические станции, 2005, № 11.

35. Хренников А.Ю., Шлегель О.А., Запорожец М.И. Диагностика повреждений силовых трансформаторов, находящихся в эксплуатации на ТЭЦ Волжского Автозавода в г.Тольятти//Электрические станции 1994 – №2 – с.43.

36. Хренников А.Ю.,Шлегель О.А. Диагностика повреждений и методика обработки результатов измерений силовых трансформаторов при испытаниях и в эксплуатации// Электротехника. – 1997 – №2 – с.32–34.

37. Хренников А.Ю. Опыт обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов//Энергетик. – №7 – 2003.

38. Хренников А.Ю., Передельский В.А., Сафонов А.А., Якимов В.А. Опыт диагностики дефектов и повреждений силовых трансформаторов, накопленный в ЗАО «ДИАРОСТ»// Сборник докладов Регионального Совета по диагностике электрооборудования при Уралэнерго. Екатеринбург, 16 – 17 сентября 2003. – бюл.19.

39. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самараэнерго методом низковольтных импульсов//Электрические станции – №11 – 2003.

40. Malewski R., Khrennikov A.Yu., Shlegel O.A., Dolgopolov A.G. Monitoring of Winding Displacements in HV Transformers in Service. – CIGRE Working Group 33.03 Italy, Padua, 4 – 9 Sept., 1995.

41. Khrennikov A.Yu. Short-circuit performance of power transformers. Transformer testing experience for reliability's increase of electric power supply. CIGRE Colloquium, Comitee A2. Moscow, 19 – 24 June, 2005

42. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самаразэнерго методом низковольтных импульсов//Электрические станции. - №11-2003.

43. Данилов Г.А., Зубков А.С. ЗАО «ФЕНИКС-88», Новосибирск, Боровицкий В.Г., Лошаков Ю.Е. ОАО «Тюменьэнерго» Надежность воздушных электросетей.

44. Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования/В.С. Богомолов, Т.Е. Касаткина, С.С. Кустов и др. // Вестник ВНИИЭ. 1997, с. 25-32.

45. Проблемы эксплуатации автотрансформаторов в энергосистеме с повышенными ТКЗ / В.С. Богомолов, Н.Н. Хубларов, М.Ю. Львов и др. // Доклад СИГРЭ 12-106, 2000.

46. «Информация по промерзанию, оттаиванию, температуре грунтов за 2000-2013 (Excel)» Copyright © atlas-yakutia.ru Россия 2007 - 2014

47. Изысканиями проектного института ООО «Спектр» г. Ноябрьск /Лицензия на проектирование объектов газового хозяйства К 020764 № ГС-5-72-02-1026-0-7202180969-008684-1 от 23 октября 2008 года/)

48. IEEE Std 142-1991 Рекомендуемая практика для заземления промышленных и коммерческих энергосистем

49. Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. —М.: Энергоатомиздат, 2004

50. Кужекин И. П., Ларионов В. П., Прохоров Е. Н. Молния и молниезащита. — М.: «Знак». 2003. 330 с.

51. Костенко М. В., Богатенков И. М., Михайлов Ю. А., Халилов Ф. Х. Заземления в сетях высокого напряжения и средства защиты от перенапряжений. Учебное пособие. Изд. ЛПИ, – Л.: 1983.
52. Данилов Г.А., Зубков А.С. ЗАО «ФЕНИКС-88», Новосибирск, Боровицкий В.Г., Лошаков Ю.Е. ОАО «Тюменьэнерго». Подвесные ОПН как средство повышения надежности работы воздушных линий электропередач (опыт применения).
53. Халилов Ф. Х., Евдокунин Г. А., Поляков В. С. и др. Под ред. Халилова Ф. Х., Евдокунина Г. А., Таджибаева А. И. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений. – СПб., 2002, 260 с. с ил.
54. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / Под редакцией Афанасьева В. В. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
55. Антипов К. М., Розет В. Е., Сергеев А. С. и др. Опыт эксплуатации ограничителей перенапряжений 110–750 кВ. Электрические станции, 1983, № 8.
56. Алиев Ф. Г., Богаутдинов Г. А., Халилов Ф. Х. Защита электроустановок горных предприятий от грозových и внутренних перенапряжений. Изд. СГИ.
57. Мнухин А. Т. и др. Исследование работы ОПН в шахтных кабельных сетях 6 кВ. Промышленная энергетика, 1983, № 1.
58. А. Бальцежак, З. Шрамек. Безыскровые ограничители перенапряжений типа ZWAR для сетей средних напряжений. Указания по применению и подбору параметров. Варшава, 1996.
59. Цинкооксидный разрядник. Техническая информация. Публикация SEWG/A 2100R, ABB Switchgear.
60. Ковалев Б.И., Киндяков В.С., Ковалева А.В., Овсянников А.Г., Максимов В.М. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше./ Департамент электрических сетей РАО «ЕЭС России», 1995.
61. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», Типовые технические решения по системам ВЧ связи, ОАО «ФСК ЕЭС», 2012

62. Коробейников С.М., А.П., Дрожжин А.П., Сарин Л.И., Челазнов А.А. Один из способов уменьшения энергии, поглощаемой ОПН при воздействии грозового импульса. В сб. докладов Всерос. Научн. Тех. Совещ. «Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, про-ва, исп. и примен. ОПН» СПб, ОАО «Электрокерамика», 8-10 октября 2001.

63. Коробейников С.М., Дрожжин А.П., Сарин Л.И. Скин-эффект в композиционных материалах. Электричество, 2004, № 7, с.2-9.

64. Коробейников С.М., Сарин Л.И., Челазнов А.А. Частото-зависимый резистор для подавления высокочастотных возмущений.

65. Коробейников С. М., Черненко Н. А., Илюшов Н. Я., Мелехов А.В. Частотозависимый резистор для молниезащиты // Первая Российская конференция по молниезащите 26-30 ноября 2007, Сборник докладов, Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, , 281-291 стр.

66. Коробейников С. М., Лавров Ю. А, Илюшов Н. Я., Бычков А. Л. Громзащита подстанций в условиях Крайнего Севера. // Сиббезопасность–СпасСиб–2013 : междунар. выст. и науч. конгр. «Совершенствование системы управления, предотвращения и демпфирования последствий чрезвычайных ситуаций регионов и проблемы безопасности жизнедеятельности населения», Новосибирск, 25–27 сент. 2013 г. : материалы науч. конгр. – Новосибирск : СГГА, 2013. – С. 116-120.

67. Коробейников С. М., Илюшов Н. Я., Лавров Ю. А., Петрова Н. Ф. Применение частотно-зависимого резистора для подавления высокочастотных перенапряжений, воздействующих на кабели и электрооборудование подстанций напряжением 110 кВ // Диагностика электрических установок : материалы 8 науч.-практ. семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок по проблемам оценки технического состояния и проверки эффективности средств защиты от грозовых и высокочастотных коммутационных перенапряжений генерируемых элегазовыми выключателями и разъединителями [Тюмень, 22–23 апр. 2013 г.] – Тюмень, 2013. – С. 194-208

68. Неймарк А.В. Электрофизические свойства перколяционного слоя конечной толщины, ЖЭТФ, т.98, в.2, 1990, стр. 611-626.
69. Фудзикара Дэнсин К.К. Сердечник силового кабеля с низкими потерями, Патент Японии №2-9401, 1990 г.
70. Мэйдэнси К.К., Токопроводящий элемент, патент Японии №13-36642, 1990 г.
71. Подоляк С. Ю. «Способ изготовления токопроводящего элемента», Патент Украины № 45352.
72. Патент на изобретение №2237333. Белокуров Е.М., Емельянов Н.И., Сарин Л.И., Челазнов А.А., Коробейников С.М., Царегородцев Н.Г., Ильиных М.В., Попов Л.Н. «Устройство для защиты от перенапряжений» 2000 г
73. Патент РФ № 2284622. Ефимов Б. В., Данилин А. Н., Колобов В. В. «Устройство для защиты от перенапряжений». 2005 г.
74. RU 2237333 – Устройство для защиты от перенапряжений.
75. Патент РФ на полезную модель №132633. Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Лавров Ю.А., Лопатин В.В., Брыкин В.П., Коробенкова А.Ю., «Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений».
76. Гашимов А.М., Мехтиев Т.Р., Бабаева Н.Р Частотнозависимый резистор, Институт Физики НАН Азербайджана, Баку, 2005.
77. Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Мехтиев Т.Р., Бабаева Н.Р Тепловые параметры и режим функционирования частотнозависимого резистора. Сборник докладов научной конференции «Электрофизика материалов и установок», Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2006. – 316 с.
78. A.M.Gashimov, T.R. Mekhtiyev, N.R.Babayeva Effect of magnetic multi-layer to resistive properties of frequency-dependent resistor. TPE-2006, 3rd International conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, 29-31 may 2006, Ankara, Turkey, p 604-606.
79. A.M.Gashimov, T.R. Mekhtiyev, N.R.Babayeva On appropriateness of use of frequency-dependent resistor at limitation of high-frequency overvoltages. MEPS'06, September 6-8, 2006, Wroclaw, Poland, p.379-382.

80. Н.Р. Бабаева Подавление высокочастотных перенапряжений в высоковольтных электрических сетях и устройствах. Проблемы энергетики, №4, 2005, стр. 40-47.

81. Кривошеев С. И., Помазов В.С., Шнеерсон Г.А. Особенности электрического взрыва скин-слоя и формирования ударной волны в мегагаусных магнитных полях// «Электротехника»

82. Илюшов Н.Я. Свириденко М.В., Измерение параметров макета многолучевого частотнозависимого резистора. Труды XI Всероссийской научно-технической конференции. 2010, Новосибирск, НГТУ.

83. Илюшов Н. Я. Низковольтные измерения частотнозависимого резистора / Н. Я. Илюшов, С. М. Коробейников // \"Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники\" (\"Доклады ТУСУР\") №1 (25) Ч.1 июнь 2012, с. 192-195

84. Измерения сопротивления двуслойного проводника резонансным способом / С. М. Коробейников, Н. Я. Илюшов, А. В. Мелехов // Электричество 2011, №10, с.52-55

85. Илюшов Н.Я., Вагин Д.В. Компьютерное моделирование частотнозависимого резистора различной формы. Новосибирск, НГТУ, 2009.

86. Илюшов Н. Я. Компьютерное моделирование частотнозависимого резистора различной формы / Н. Я. Илюшов, Д. В. Вагин, С. Г. Назаров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2011. — № 1. —С.310-313

87. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. Новосибирск, НГТУ, 2006.

86. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб.пособие. – Н.: Высш. школа, 1983

88. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986.

89. Методы физического моделирования грозопоражаемости наземных объектов / А. Г. Овсянников, А. С. Гайворонский // Сб. докладов 1-й Российской конференции по молниезащите,, 26-30 ноября, 2007, Новосибирск.

90. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. Издательство: Наукова Думка Год: 1975

92. Овсянников А. Г. Высокочастотные перенапряжения на ВЛ 110 кВ при отключениях отпаечных линий / А. Г. Овсянников, В.Г. Боровицкий, И. М. Дубинский // Сборник докладов пятой Российской н-практ. конф. с международным участием \"Линии электропередачи 2012: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс\"

93. Экспериментальные и теоретические исследования условий возникновения феррорезонанса в сети 500 кВ с трансформаторами напряжения типов НКФ и НАМИ / А. С. Гайворонский, О. И. Лаптев, К. П. Кадомская // Сб. докл. IX Междунар. симп. \"Электротехника 2030\" Перспективные технологии электротехники (ТРАВЭК), 28мая-01июня2007г., с.140-147

94. Отчет о научно-исследовательской работе «Проведение высоковольтных испытаний опытных образцов частотозависимого резистора», ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» – «СибНИИЭ», договор № 3354

95. Горюнов В.А., Коробейников С.М., Нестеров С.В., Целебровский Ю.В., Цилько В.А. Технология конструкционных материалов. НГТУ, 2009

**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО**  
**«Научно-технический центр Федеральной сетевой компании**  
**Единой энергетической системы»**  
**Филиал ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - СИБНИИЭ**

---

**«Утверждаю»**

Директор Филиала

ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» – «СибНИИЭ»

\_\_\_\_\_ Кандаков С.А.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

**О Т Ч Е Т**

**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**по теме: «Подготовка и проведение высоковольтных испытаний**  
**частотозависимого устройства»**

**Этап 3. «Проведение высоковольтных испытаний опытных образцов**  
**частотозависимого устройства»**

(договор № 3354)

Научный руководитель темы,

к.т.н.



А.С. Гайворонский

Новосибирск, 2014 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы – заместитель директора, начальник отдела инжиниринга, к.т.н.	Гайворонский А.С.	Постановка задачи, обсуждение результатов исследований.
Начальник лаборатории высоковольтных испытаний	Крусс А.М.	Проведение испытаний, экспериментальных исследований.
Ведущий инженер	Евдокимов А.Н.	
Старший инженер	Пушканов А.С.	
Старший инженер	Гольцов В.А.	
Инженер	Юхименко В.Я.	
Старший научный сотрудник, к.т.н.	Богданов О.В.	Постановка, проведение испытаний, написание отчета
Старший научный сотрудник	Клепиков А.В.	Разработка стенда для испытаний
Ведущий научный сотрудник, к.т.н.	Заболотников А.П.	Обсуждение результатов эксперимента
Ведущий научный сотрудник, к.т.н.	Яншин Э.В.	Обсуждение результатов эксперимента

## РЕФЕРАТ

Отчет: 23 с, 6 рисунков, 6 таблиц, 2 приложения.

### ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ЧАСТОТОЗАВИСИМОЕ УСТРОЙСТВО, ГРОЗОВОЙ ИМПУЛЬС НАПРЯЖЕНИЯ, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОДСТАНЦИЯ

Объект исследований – частотозависимое устройство (ЧЗУ), предназначенный для защиты от высокочастотных перенапряжений в электрических сетях переменного частоты 50 Гц класса напряжения 110 кВ.

Цель исследований – проверка защитного действия, электрической прочности частотозависимого устройства при воздействии грозовых перенапряжений, вызванных набеганием грозовых волн с отходящих воздушных линий на подстанции.

Приводятся результаты испытаний электрической прочности изоляции ЧЗУ при воздействии напряжения полных и срезанных грозовых импульсов, а также результаты экспериментальных исследований по проверке защитного действия ЧЗУ при набегании грозовых волн с ВЛ на ПС.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

### **1 ПРОТОКОЛ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ЧАСТОТОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА**

1.1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА И ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ **Ошибка! Закладка не определена.**

1.2 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

1.3 УСЛОВИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ

1.4 ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

1.5 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

1.6 ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

### **ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

### **ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

## **ВВЕДЕНИЕ**

В соответствии с календарным планом и ТЗ на НИР данный этап работы включал проведение приемочных испытаний опытных образцов частотозависимого устройства (ЧЗУ).

В настоящем отчете представлен протокол приемочных испытаний ЧЗУ. Приводится описание программы и методики испытаний, результатов испытаний электрической прочности изоляции ЧЗУ при воздействии напряжения грозовых импульсов и испытаний ЧЗУ переменным напряжением промышленной частоты на отсутствие видимой короны. Приводятся результаты испытаний ЧЗУ в синтетических схемах, имитирующих грозовые перенапряжения на ПС, возникающие при набегании грозовых волн с отходящих линий.

# 1 ПРОТОКОЛ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ЧАСТОТОЗАВИСИМОГО УСТРОЙСТВА

## 1.1 Характеристика объекта и цель испытаний

1.1.1 Объектом испытаний являлся опытный образец частотозависимого устройства на напряжение 110 кВ, изготовленный «НГТУ» по договору №8/12-СИЗП «Разработка частотозависимого устройства для подавления высокочастотных перенапряжений».

Частотозависимое устройство (далее - ЧЗУ) предназначено для защиты от грозовых и высокочастотных перенапряжений в электрических сетях переменного частоты 50 Гц класса напряжения 110 кВ.

Основные характеристики ЧЗУ в соответствии с требованиями технического задания на разработку по договору №8/12-СИЗП приведены в таблице 1.1. Описание конструкции и принципа действия ЧЗУ приводится в приложении 1.

Таблица 1.1 – Основные характеристики ЧЗУ.

№ п.п.	Наименование характеристики	Значение
1	Класс напряжения, кВ	110
2	Номинальный ток, кА	0,2
3	Рассеиваемая мощность, кВт	1,0
4	Частотный диапазон, кГц	0,05 - 1000
5	Испытательное напряжение грозового импульса, кВ: - полного; - срезанного.	480 500

1.1.2 Целью испытаний являлось:

- Проверка соответствия опытного образца ЧЗУ требованиям технического задания на разработку по договору №8/12-СИЗП;
- Проверка работоспособности ЧЗУ перед установкой в опытную эксплуатацию на ПС 110 кВ в ОАО «Тюменьэнерго».

## 1.2 Программа и методика испытаний

1.2.1 Испытания проводились по показателям, в объеме и последовательности, указанным в таблице 1.2. Общие условия и методы проведения испытаний – по ГОСТ 1516.2.

Таблица 1.2 – Состав испытаний ЧЗР.

№ п.п.	Наименование показателя, вид испытаний	Нормированное значение показателя	Испытуемые образцы
<b><i>Испытания электрической прочности изоляции ЧЗУ</i></b>			
1.	Испытательное напряжение полного грозового импульса.	480 кВ	Опытный образец ЧЗУ
2.	Испытательное напряжение срезанного грозового импульса.	550 кВ	Образец, испытанный по п. 1
3.	Отсутствие видимой короны при переменном напряжении промышленной частоты.	Отсутствие критических стримерных разрядов при напряжении 80 кВ	Образец, испытанный по п. 2
<b><i>Испытания защитного действия ЧЗУ при воздействии грозовых волн</i></b>			
4.	Защитное действие ЧЗУ при набегании грозовой волны на тупиковую ПС 110 кВ.	Снижение амплитуды и крутизны фронта грозовых перенапряжений на оборудовании ПС	Образец, испытанный по п. 3
5.	Защитное действие ЧЗУ при набегании грозовой волны на ПС 110 кВ с 2 отходящими ВЛ.		

### ***1.2.2 Испытания электрической прочности изоляции ЧЗУ.***

1.2.2.1 Испытания электрической прочности изоляции проводились на макете изолирующей подвески ЧЗУ. Опытный образец ЧЗУ подвешивался в вертикальном рабочем положении на высоте 5 м от уровня пола с помощью

полимерного изолятора типа ЛК 120/500. Элементы опорной конструкции не макетировались. Подвод напряжения к объекту осуществлялся медным проводом, который присоединялся к верхнему линейному выводу ЧЗУ. Нижний линейный вывод при испытании напряжениями грозовых импульсов заземлялся, при испытании переменным напряжением промышленной частоты оставался завешенным.

Общий вид ЧЗУ на испытательном поле показан на рисунке 1.1.

1.2.2.2 Испытание напряжениями грозовых импульсов проводилось «15-ти ударным методом» – приложением к ЧЗУ стандартных полных и срезанных грозовых импульсов напряжения положительной и отрицательной полярности с максимальным значением, равным нормированному испытательному напряжению (см. таблицу 2.1).

Схема испытаний приведена на рисунке 1.2,а. Генератор импульсов напряжения (ГИН) настраивался на стандартную грозовую волну: 1,2/50 мкс. При этом форма грозового импульса напряжения на испытуемом объекте – ЧЗУ отличалась от стандартной из-за малой индуктивности ЧЗУ.

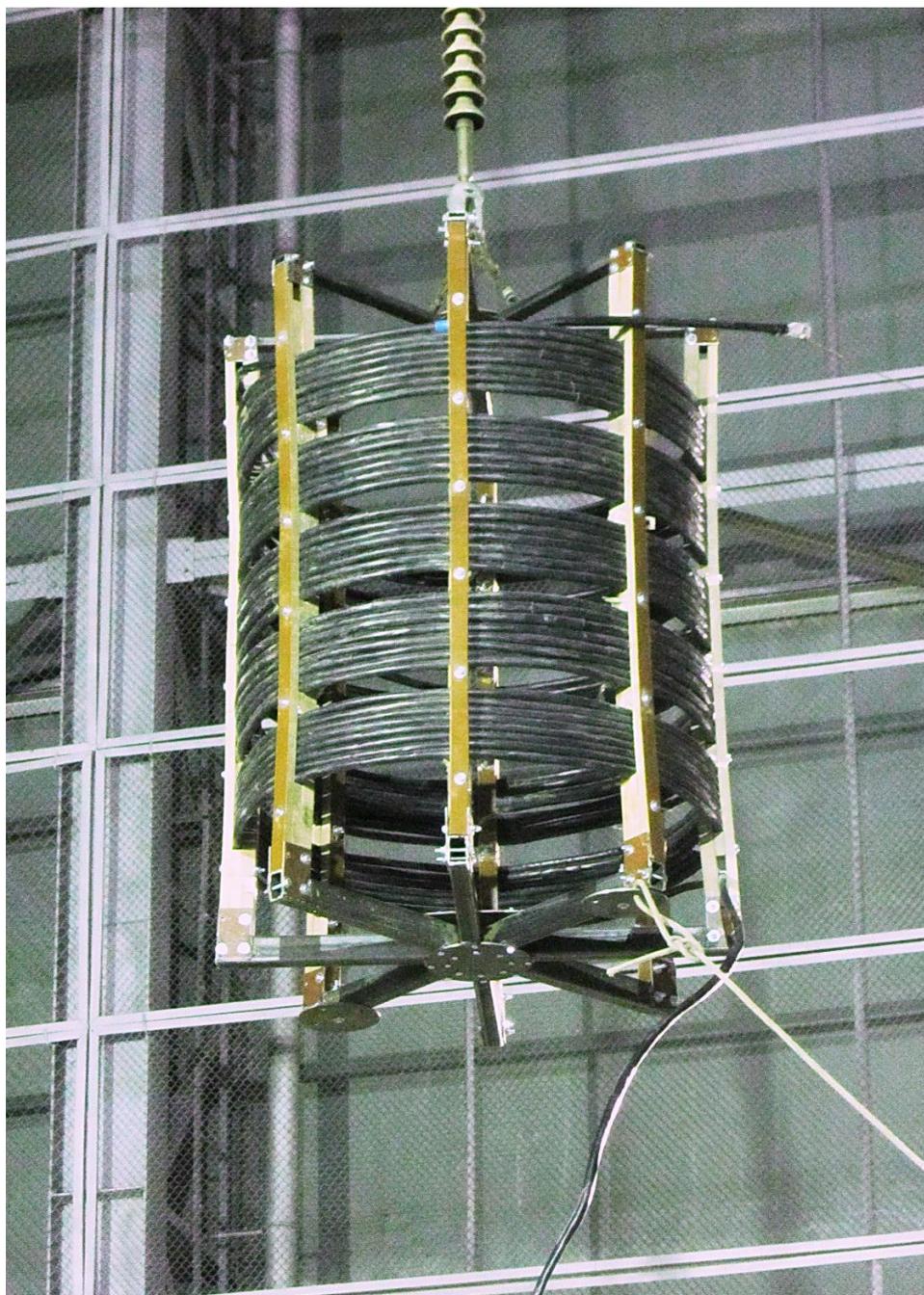
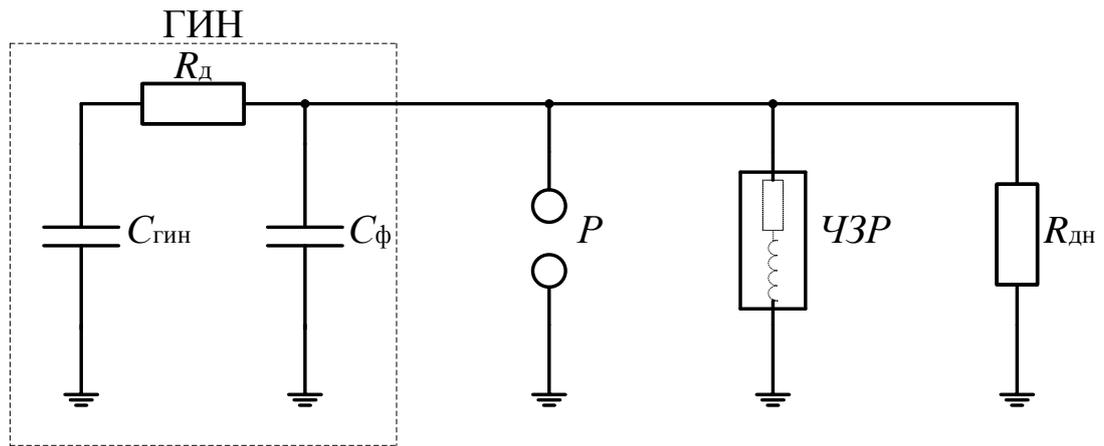
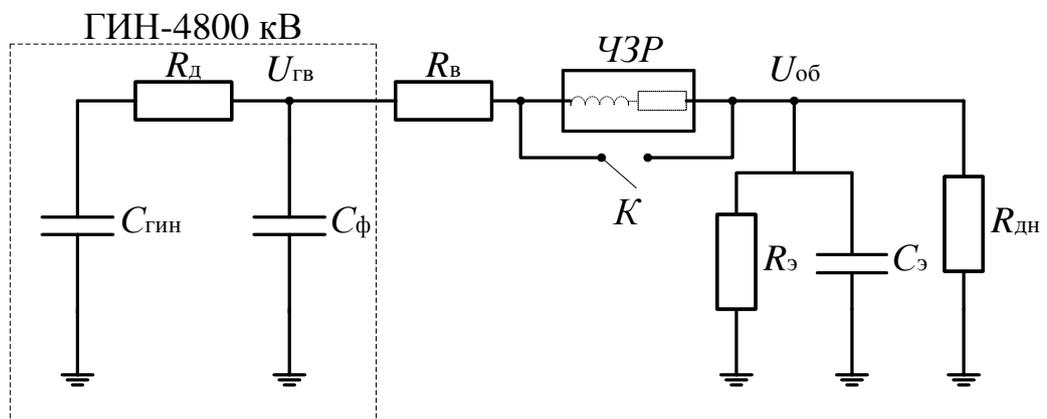


Рисунок 1.1 – Общий вид подвески ЧЗУ на испытательном поле



а) испытание электрической прочности изоляции;



б) испытание защитного действия ЧЗУ

ГИН – генератор импульсов напряжения;

$C_{\text{гин}} = 35$  нФ – емкость ГИН в ударе;

$R_{\text{д}} = 400$  Ом – демпферное сопротивление;

$C_{\text{ф}} = 560$  пФ – демпферная емкость;

$P$  – срезающий разрядник;

ЧЗУ – частотозависимое устройство;

$R_{\text{дн}} = 10$  кОм – омический делитель напряжения;

$R_{\text{в}} = 500$  Ом – волновое сопротивление ВЛ;

$R_{\text{з}} = 500$  Ом – эквивалентное волновое сопротивление отходящей ВЛ;

$C_{\text{з}} = 3$  нФ – эквивалентная входная емкость ПС;

$K$  – контактор.

Рисунок 1.2 – Схемы испытаний ЧЗУ

Характерные осциллограммы полного и срезанного грозовых импульсов приведены на рисунке 1.3. Параметры полного грозового импульса составляли: длительность фронта – 1,17 мкс, длительность импульса – 2,6 мкс; параметры срезанного грозового импульса: предразрядное время – 2-3 мкс, коэффициент перехода через ноль – 0,14.

1.2.2.3 Испытание на отсутствие видимой короны проводилось приложением к ЧЗУ переменного напряжения промышленной частоты, равного 80 кВ. Испытание проводилось в затемненном помещении. Коронные разряды регистрировались с помощью прибора Филин-6.

### ***1.2.3 Испытания защитного действия ЧЗР***

1.2.3.1 Испытания защитного действия ЧЗУ проводились в синтетической схеме, имитирующей грозовые перенапряжения, воздействующие на оборудование ПС 110 кВ при набегании грозовых волн с отходящих линий.

Схема испытаний приведена на рисунке 1.2,б. В качестве источника напряжения использовался ГИН - 4800 кВ, который настраивался на стандартную грозовую волну с временными параметрами 1,2/50 мкс. Волновое сопротивление подходящей линии имитировалось активным сопротивлением  $R_{в} = 500 \text{ Ом}$ , схема ПС – эквивалентной входной емкостью  $C_{э} = 3 \text{ нФ}$  и волновым сопротивлением отходящей линии  $R_{э} = 500 \text{ Ом}$ . Активные сопротивления  $R_{в}$  и  $R_{э}$  были выполнены из 5 последовательно соединенных безиндуктивных демпферных сопротивлений из комплекта ГИН. В качестве входной емкости  $C_{э}$  использовались импульсные конденсаторы типа КОJ 3-600/0,0015 номиналом 1,5 нФ на напряжение 600 кВ.

Испытуемый образец ЧЗУ включался в рассечку между  $R_{в}$  и эквивалентной схемой ПС. Регистрировалось напряжение на выходе ГИН ( $U_{ГВ}$ ) и на объекте ( $U_{ОБ}$ ). Измерение напряжения проводилось с помощью однотипных омических делителей напряжения из комплекта ГИН.

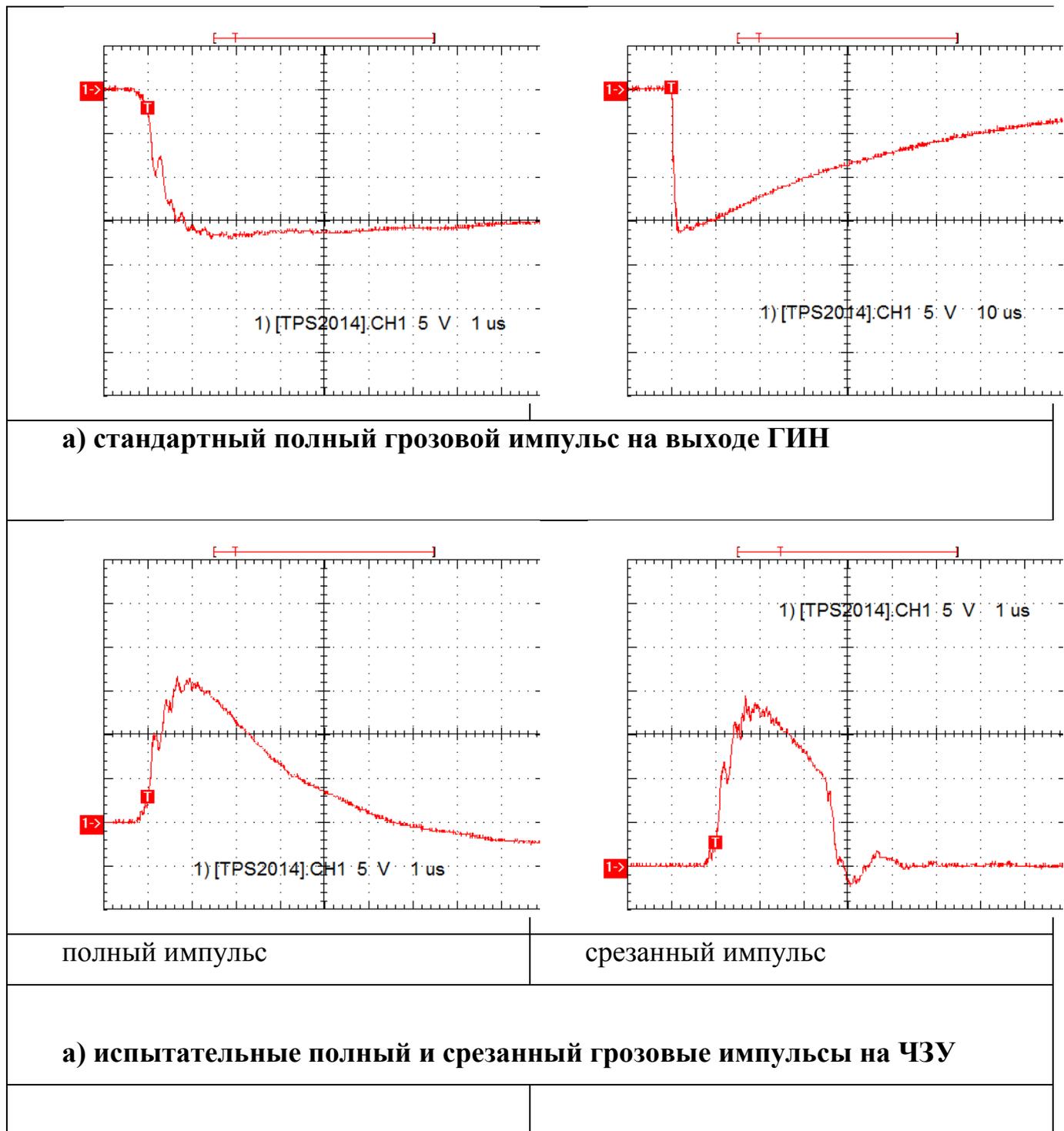


Рисунок 1.3 – Осциллограммы испытательных грозовых импульсов напряжения.

Испытания включали 2 серии опытов при различных условиях испытаний, указанных в таблице 1.3. В первой серии опытов (без  $R_3$ ) имитировалось набегание грозовой волны на тупиковую ПС (с одной подходящей линией). Во второй серии (с  $R_3$ ) – набегание грозовой волны на ПС при наличии дополнительной отходящей линии. В каждой серии проводились опыты сначала без ЧЗУ (К - замкнут), затем с ЧЗУ (К - разомкнут).

Защитное действие ЧЗУ оценивалось по изменению параметров напряжения на объекте в опытах «а» и «б»: амплитуды и длительности фронта импульса.

Таблица 1.3 – Условия проведения испытаний защитного действия ЧЗУ.

Номер опыта в серии	Условия испытаний		
	Напряжение $U_{ГВ}$ , кВ	Наличие $R_3$	Состояние контактора ЧЗР
<i>Серия 1</i>			
1-а	500	отсутствует	замкнут
1-б			разомкнут
<i>Серия 2</i>			
2-а	1000	присутствует	замкнут
2-б			разомкнут

### 1.3 Условия при проведении испытаний

Испытания проводились в закрытом помещении при следующих атмосферных условиях, указанных в таблице 1.4.

Таблица 1.4.

Пункт программы испытаний	Атмосферные условия		
	давление $P$ , мм. рт. ст.	температура $t$ , °С	относительная влажность $\gamma$ , %
1	753	+13,5	12
2, 3, 4	740	+8,1	12
5	752	+8,2	17

## 1.4 Испытательное оборудование и средства измерений

Перечень испытательного оборудования и средств измерений, использованных при проведении испытаний, приведен в таблице 1.5.

Таблица 1.5.

/п	Наименование испытательного (измерительного) оборудования, тип, заводской номер	Наименование испытаний или измеряемых характеристик	Документ об аттестации и поверке, номер и срок действия
	Генератор импульсов напряжения SP 414/4800, №870890	Испытание напряжением грозового импульса	Аттестат №2-06-09 до 06.2014 г.
	Измерительная система высокого напряжения SMR 10/2200-ПРОК-1С	Амплитуда и временные параметры напряжения грозового импульса	Сертификат о калибровке №004721 до 19.09.2014.г
	Осциллограф цифровой TPS-2014, зав. №С020694		Свид-во №014681 до 22.03.2014 г.
	Испытательная установка переменного напряжения WP 2250/2250 (первая ступень), №866890	Испытание напряжением промышленной частоты	Аттестат №1-06-09 до 06.2014
	Измерительная система высокого напряжения FWMC 255/750-MUT-7, зав.№866842, 861942	Амплитудное значение напряжения промышленной частоты	Сертификат о калибровке №004725 до 19.09.2014..
	Термогигрометр ИВА – 6А-ПД, зав. №260А	Атмосферные условия: давление, температура, относительная влажность воздуха	Свид-во №015843 до 12.07.2014.г.

## 1.5 Результаты испытаний

### 1.5.1 Электрическая прочность изоляции ЧЗУ

1.5.1.1 Опытный образец ЧЗУ выдержал приложение 15 полных грозовых импульсов напряжения положительной и отрицательной полярности амплитудой 480 – 490 кВ без пробоев и перекрытий.

ЧЗУ выдержало приложение 15 срезанных грозových импульсов напряжения положительной и отрицательной полярности амплитудой 550 - 560 кВ без пробоев и перекрытий.

ЧЗУ выдержало дополнительное приложение грозových импульсов напряжения положительной полярности со ступенчатым повышением амплитуды напряжения до перекрытия изоляции. Первое перекрытие изоляции было зафиксировано при напряжении 605 кВ, второе перекрытие изоляции – при напряжении 720 кВ. Фотография перекрытия и соответствующая ей осциллограмма импульса напряжения приведены на рисунке 1.4. По виду разрядов и характеру среза напряжения на осциллограмме можно предположить, что в данном случае имело место только частичное перекрытие изоляции между витками ЧЗУ.

1.5.1.2 Опытный образец ЧЗУ выдержал испытание переменным напряжением промышленной частоты на отсутствие видимой короны. При нормированном напряжении 80 кВ коронные разряды на элементах конструкции ЧЗУ отсутствовали. Характерная эпограмма приведена в приложении 2.

### ***1.5.2 Защитное действие ЧЗУ***

1.5.2.1 Результаты испытаний защитного действия ЧЗУ в обобщенном виде представлены в таблице 1.6, где приводятся параметры импульсов напряжения, зафиксированных на объекте (схеме ПС) в различных сериях опытов при наличии и без ЧЗУ. Характерные осциллограммы импульсов напряжения показаны на рисунках 1.5, 1.6.

Таблица 1.6 – Параметры импульсов напряжения на объекте при испытании защитного действия ЧЗУ.

Наименование параметра	Значение параметра:	
	без ЧЗУ	при наличии ЧЗУ
<b>Серия 1 – тупиковая ПС без R<sub>Э</sub></b>		
Амплитуда напряжение на выходе ГИН, U <sub>ГВ</sub> , кВ	419	416
Амплитуда напряжения на объекте, U <sub>Об</sub> , кВ	395	419
Длительность фронта импульса напряжения на объекте, мкс	6,7	5,0
Ссылка на осциллограмму	Рисунок 1.5,а	Рисунок 1.5,б
<b>Серия 2 – схема ПС с отходящей ВЛ при наличии R<sub>Э</sub></b>		
Амплитуда напряжение на выходе ГИН, U <sub>ГВ</sub> , кВ	947	977
Амплитуда напряжения на объекте, U <sub>Об</sub> , кВ	462	415
Длительность фронта импульса напряжения на объекте, мкс	2,9	3,3
Ссылка на осциллограмму	Рисунок 1.6,а	Рисунок 1.6,б

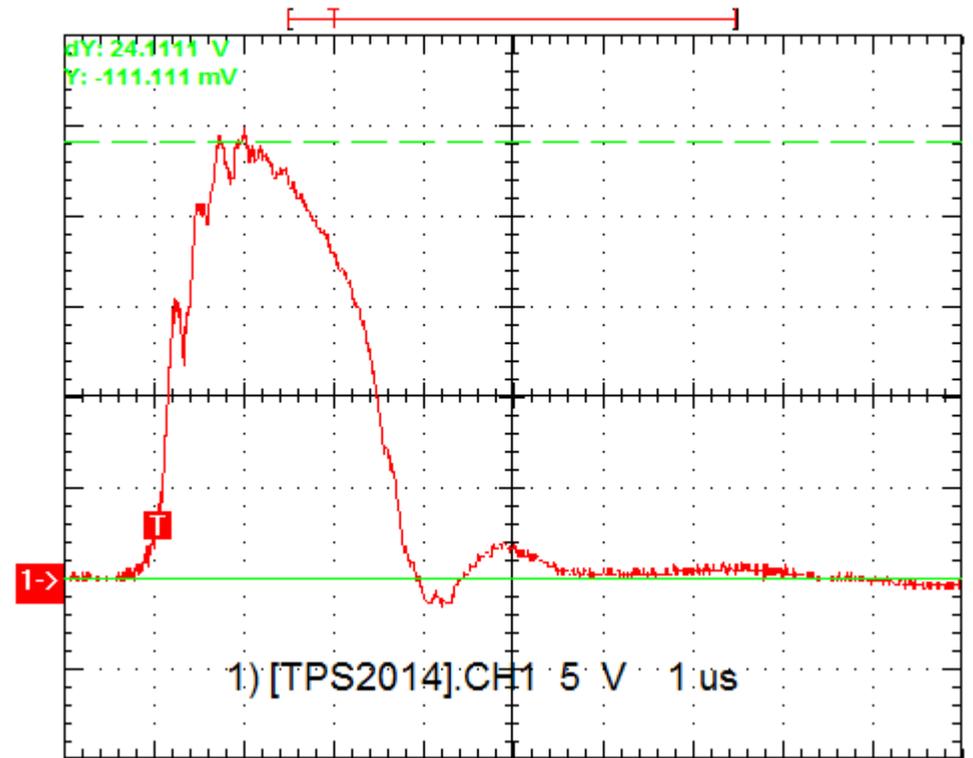
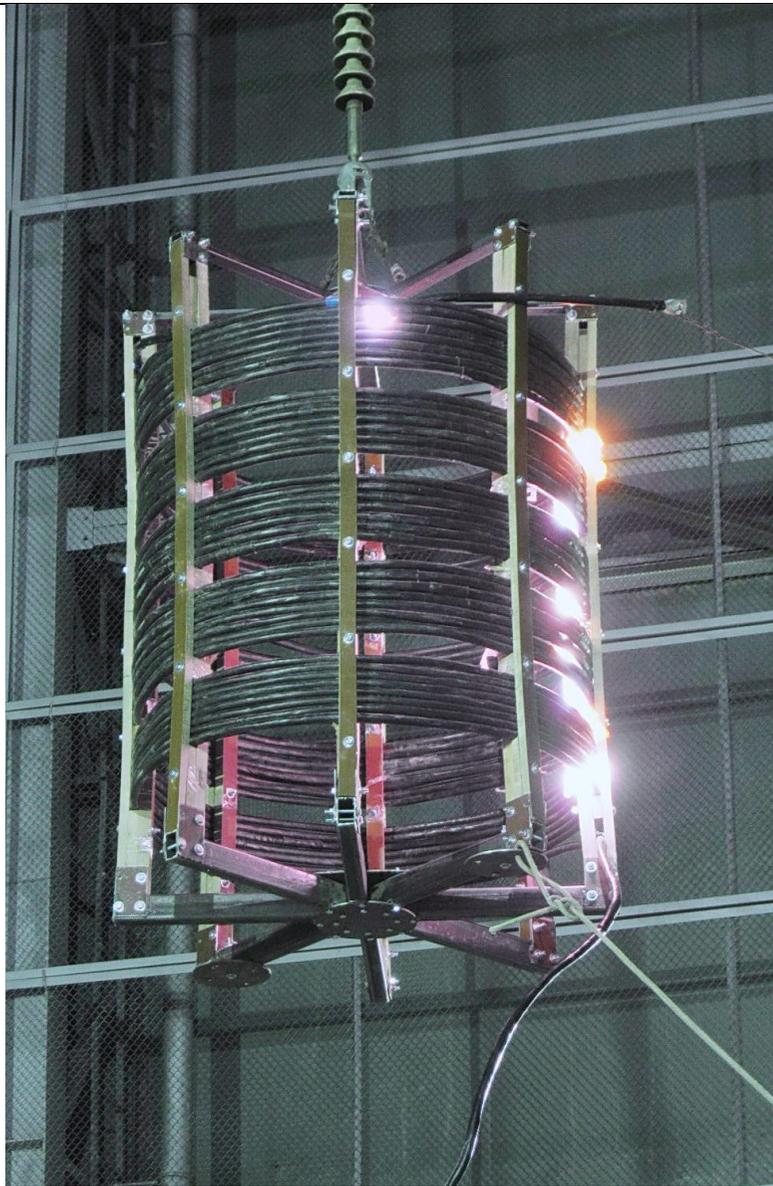
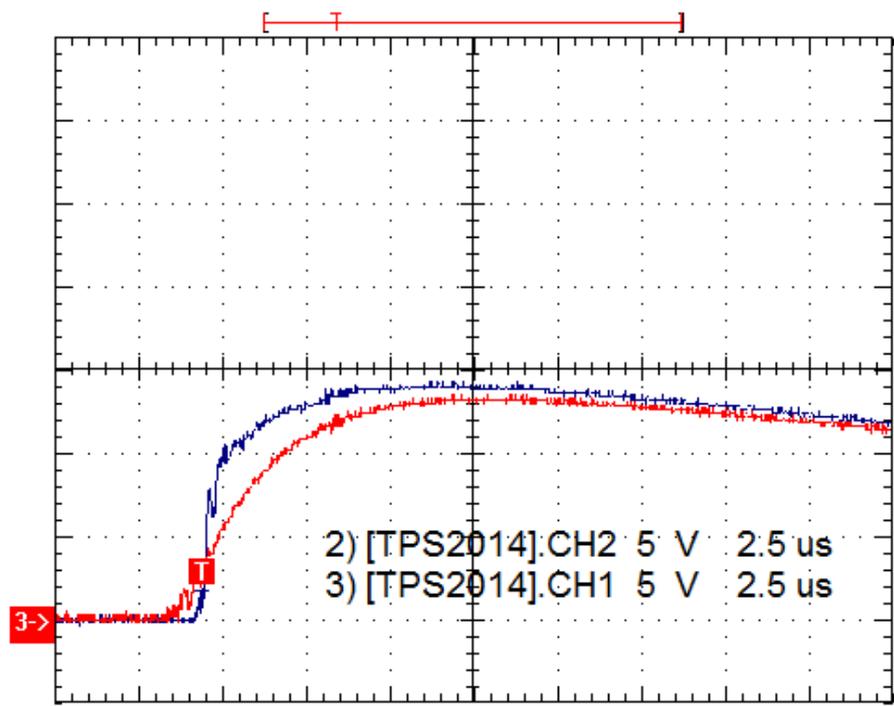
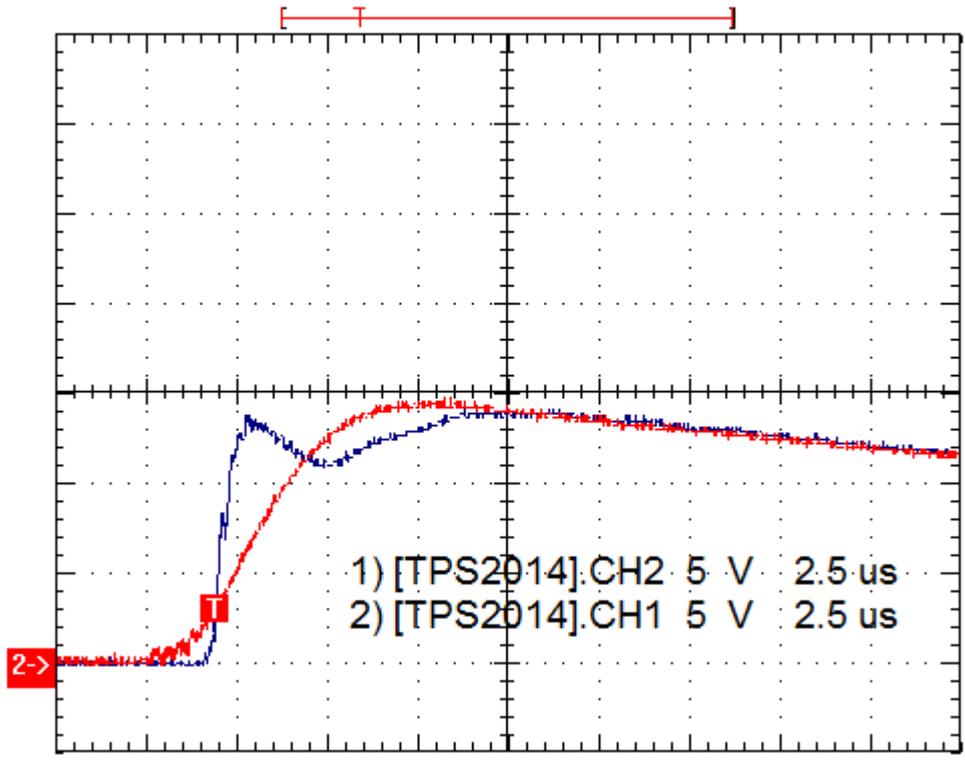


Рисунок 1.4 – Фотография перекрытия ЧЗУ при напряжении полного грозового импульса амплитудой 720 кВ

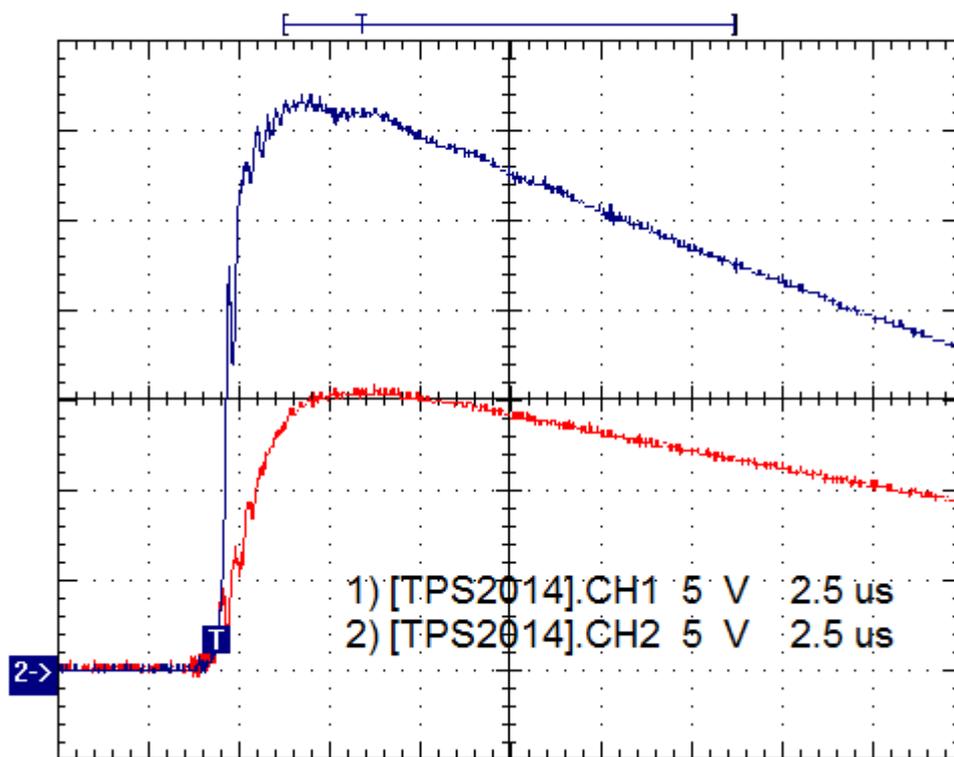


а) опыт 1-а, таблица 1.3

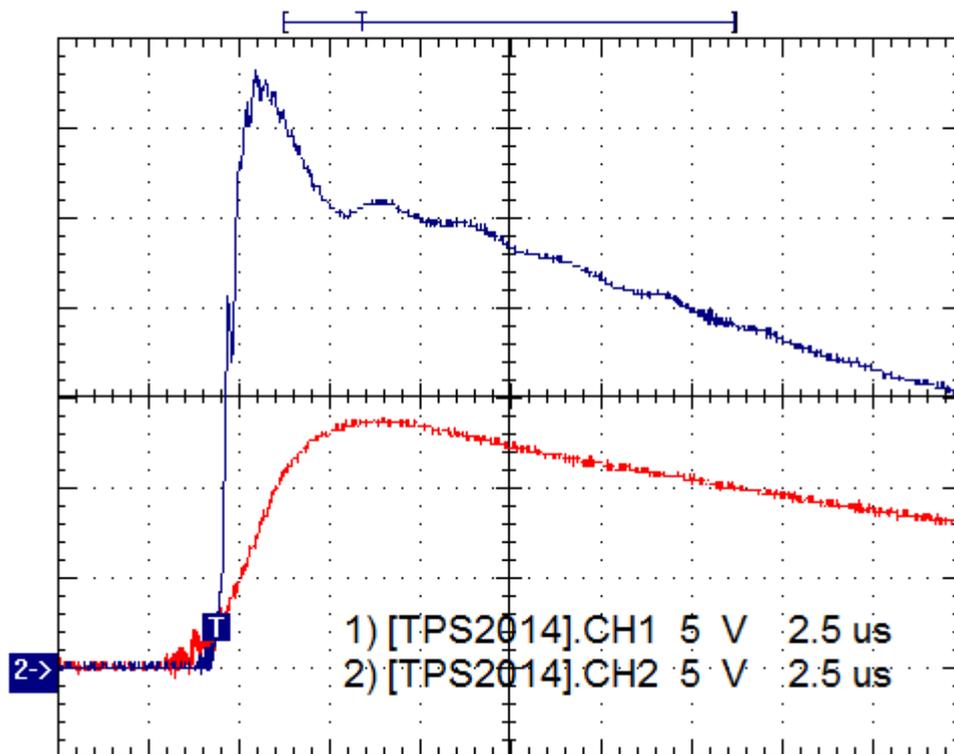


б) опыт 1-б, таблица 1.3

Рисунок 1.5 – Характерные осциллограммы импульсов напряжения, полученные в опытах 1 серии (синий луч – напряжение на выходе ГИН, красный – напряжение на объекте)



а) опыт 1-а, таблица 1.3



б) опыт 1-б, таблица 1.3

Рисунок 1.6 – Характерные осциллограммы импульсов напряжения, полученные в опытах 2 серии (синий луч – напряжение на выходе ГИН, красный – напряжение на объекте)

Основываясь на приведенных данных можно констатировать следующее:

1 В опытах 1 серии в схеме с тупиковой ПС защитное действие ЧЗУ отмечено не было. Более того, при наличии ЧЗУ было зафиксировано даже некоторое обострение формы импульса напряжения на объекте по сравнению с отсутствием ЧЗР, а именно: увеличение амплитуды напряжения на 6% и уменьшение длительности фронта на 30%.

2 В опытах 2 серии в схеме ПС с дополнительной отходящей линией отмечено защитное действие ЧЗУ, которое проявилось в увеличении длительности фронта импульса напряжения на объекте примерно на 14%. Амплитуда напряжения на объекте также снизилась примерно на 10%. Однако в отношении снижения амплитуды эффект не столь однозначный, поскольку зарядное напряжение ГИН в опытах с ЧЗУ также было меньшим примерно на 16%.

## **1.6 Выводы и рекомендации**

1.6.1 Результаты проведенных испытаний подтверждают соответствие электрической прочности изоляции ЧЗУ при воздействии напряжения полных и срезанных грозовых импульсов амплитудой 480 и 550 кВ, соответственно, требованиям технического задания на разработку по договору №8/12-СИЗП.

1.6.2 Результаты испытаний подтверждают соответствие ЧЗУ требованиям ГОСТ 1516.3 по отсутствию видимой короны при переменном напряжении промышленной частоты, равном 80 кВ.

1.6.3 Результаты испытаний подтверждают защитное действие ЧЗУ при воздействии грозовых волн, набегающих с ВЛ на ПС. Защитное действие ЧЗР имеет место в схемах ПС с числом отходящих ВЛ не менее 2 и проявляется в увеличении длительности фронта импульса напряжения, воздействующего на оборудование ПС, на 14%. В схемах с тупиковыми ПС защитное действие ЧЗУ отсутствует.

1.6.4 Опытные образцы ЧЗУ могут быть рекомендованы для установки в опытную эксплуатацию на ПС 110 кВ с числом отходящих ВЛ не менее 2.

## Описание конструкции и принципа действия ЧЗУ

Частотозависимое устройство (ЧЗУ) изготовлено из двух частей: алюминиевого провода А-150 диаметром 15,8 мм и аморфной ленты 5БДСР толщиной 25 мкм. Лента плотно намотана по поверхности провода секциями шириной 50 мм, расстояние между секциями 3-4 мм. Каждая секция состоит из 12 слоев. Поверх ленты одеты два слоя термоусадочной трубки. Первый слой трубка ТТУ 30/15 толщиной после усадки 1 мм с диапазоном рабочих температур от  $-55$  до  $105^{\circ}$  и минимальной электрической прочностью 20 кВ/мм. Второй слой – термоусадочная трубка ТУТ, толщиной 1,5 мм с минимальной электрической прочностью 30 кВ/мм. Минимальное удельное электрическое сопротивление каждой трубки не менее  $10^{14}$  Ом·см. Общая длина ЧЗУ составляет 120 м. Провод намотан на катушку диаметром 1000 мм и высотой 1455 мм секциями по 8 витков с разрывами между секциями в 100 мм для снижения ветровой нагрузки. Общий вид конструкции приведен на рисунке П1.1

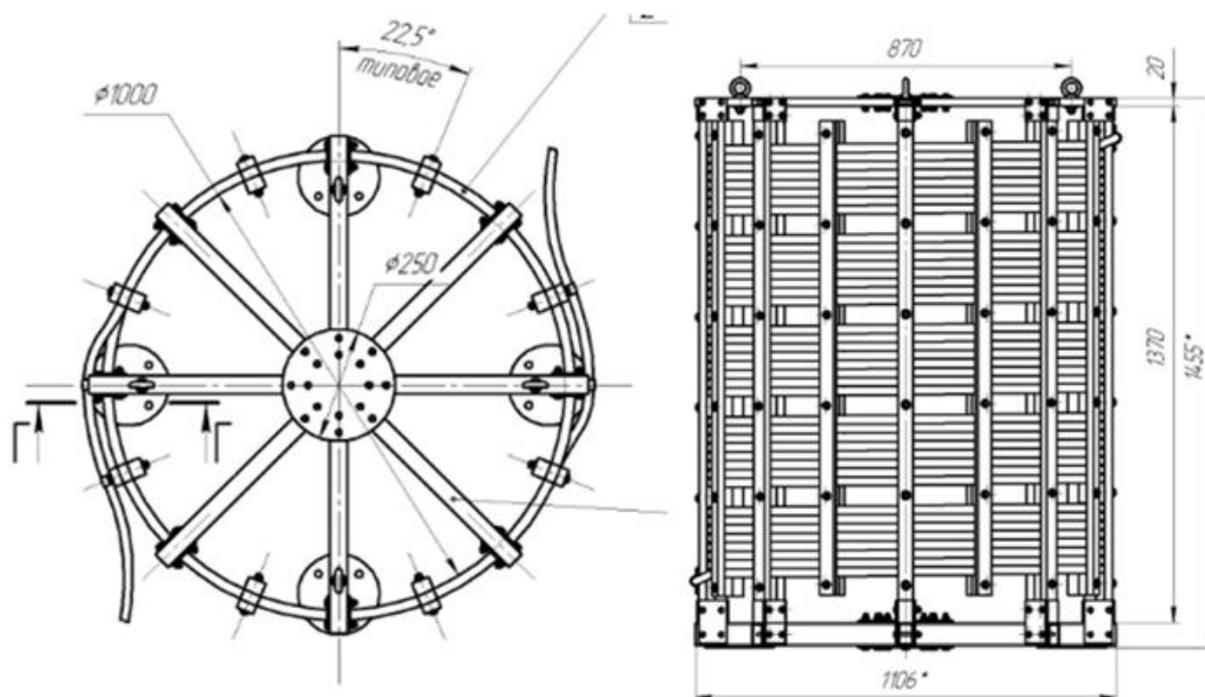


Рисунок П1.1 - Общий вид конструкции ЧЗУ.

ЧЗУ должно включаться последовательно в цепь между фазным проводом и шиной подстанции. Предполагается установка резистора на двух гирляндах подвесных изоляторов в окне портала.

На рабочей частоте ЧЗУ должно иметь сопротивление близкое к сопротивлению фазного провода. С приходом грозового импульса перенапряжения его сопротивление за счёт скин-эффекта, то есть выталкивания тока из алюминиевого провода в аморфную ленту, имеющую магнитную проницаемость не менее 50 000, должно многократно возрастать. Номинальные параметры ЧЗУ в соответствии с требованиями заказчика должны соответствовать следующим:

Класс напряжения, кВ	110
Номинальный ток, кА	0,2
Рассеиваемая мощность, кВт	1
Частотный диапазон	50 Гц – 1 МГц
Требования к электрической прочности	
Испытательное напряжение:	
-полного грозового импульса, кВ	480
-срезанного грозового импульса, кВ	550

Геометрическая индуктивность ЧЗУ при диаметре катушки 100 см, длине общей катушки 130 см и 40 витках составит 914,2 мкГн  $\approx$  0,9 мГн.

Компьютерное моделирование устройства показывает, что за счет скин-эффекта индуктивность может увеличиться примерно на 10-20%. При этом активное сопротивление на грозовой частоте ( $f=300$  кГц) должно иметь повышенные значения примерно до 120 Ом.

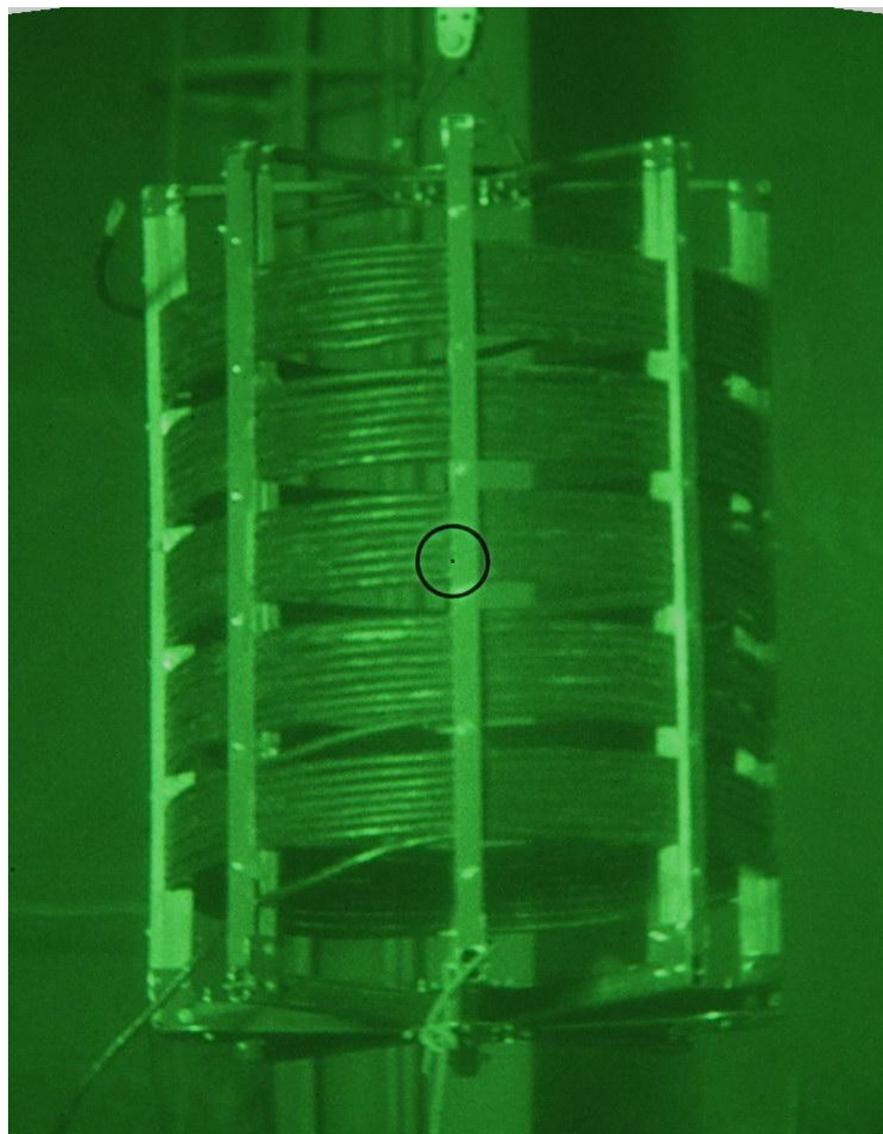


Рисунок П2.1 – Эопограмма, иллюстрирующая отсутствие коронных разрядов на элементах конструкции ЧЗУ при испытательном напряжении 80 кВ.

## Приложение Б

АКТ  
установки в опытную эксплуатацию

Договор 8/12-СИЗП от 28.08.2012 г.  
ЭТАП 2

« 23 » апреля 2014 г.

Настоящим актом филиал ОАО «Тюменьэнерго» Ноябрьские электрические сети подтверждает установку в опытную эксплуатацию трех опытных образцов частотозависимого резистора для подавления высокочастотных перенапряжений на п/ст Сугмутская Ноябрьских сетей ОАО Тюменьэнерго, переданных исполнителем ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ) в соответствии с техническим заданием на работу.

Заместитель  
директора по техническим  
вопросам - главный  
инженер филиала ОАО  
«Тюменьэнерго»  
Ноябрьские электрические  
сети



А.В. Филиппов