

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ФОМИНА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И  
СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ  
ТОКА СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Овсянников Александр Георгиевич

Новосибирск – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА.....	10
1.1 Общие сведения .....	10
1.2 Опыт эксплуатации трансформаторов тока серии ІМВ.....	22
1.3 Высокочастотные перенапряжения и внутренние резонансы в подстанционном оборудовании.....	27
1.4 Диагностирование и мониторинг оборудования с изоляцией конденсаторного типа.....	42
1.5 Анализ сведений о трансформаторном масле и методах его исследования..	55
1.6 Выводы по главе.....	66
ГЛАВА 2 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КОММУТАЦИЯХ РАЗЪЕДИНИТЕЛЯМИ .....	68
2.1 Общие сведения .....	68
2.2 Механизм генерации и параметры ВЧ перенапряжений.....	69
2.3 Экспериментальные исследования перенапряжений и токов при коммутациях разъединителями ячеек с трансформаторами тока .....	80
2.4 Экспериментальные исследования переходных и частотных характеристик трансформатора тока ІМВ550.....	90
2.5 Выводы по главе.....	98
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ВНУТРИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА.....	100
3.1 Разработка математической модели первичной обмотки трансформатора тока ІМВ 550.....	100
3.2 Физическое моделирование переходных процессов в макете первичной обмотки .....	104
3.3 Математическое моделирование частотных и переходных характеристик первичной обмотки трансформатора тока ІМВ 550 .....	112
3.4 Моделирование переходных процессов в схемах замещения открытого распределительного устройства 500 кВ подстанции «Итатская 1150 кВ» .....	114
3.5 Выводы по главе.....	117

ГЛАВА 4 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА .....	118
4.1 Экспериментальная проверка метода диагностирования изоляции по частотной характеристике диэлектрической потерь .....	118
4.2 Методики и результаты расширенных исследований свойств масла в изоляции трансформаторов тока .....	121
4.3 Методики и результаты исследований продуктов, составляющих X-воск в бумажной изоляции .....	130
4.4 Выводы по главе.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	135
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	158

## ВВЕДЕНИЕ

Отечественная электроэнергетика вплотную подошла к необходимости радикального технического перевооружения парка высоковольтного электрооборудования и линий электропередачи. Реконструкция сетей и подстанций – главное условие надёжной работы энергосистем, построенных 30-40 лет назад. Старое оборудование заменяется новым, в том числе, импортным. Очевидно, что внедрение в электроэнергетику зарубежного электрооборудования должно осуществляться лишь при условии его технической и коммерческой приемлемости.

Измерительный трансформатор тока один из самых распространённых, но, увы, не самых надёжных видов электротехнического оборудования на подстанциях. К тому же, в СССР трансформаторы тока (ТТ) классов напряжения (220 – 750) кВ изготавливались преимущественно в Украине, поэтому их импорту из-за рубежа в настоящее время альтернативы нет.

К сожалению, опыт эксплуатации импортных ТТ первых поставок завершился серией отбраковок по результатам профилактических испытаний и отказов. Как было выявлено Л.А. Дарьяном первопричиной отказов ТТ типа ИМВ 550, установленных на подстанции «Итатская – 1150 кВ» было механическое повреждение сильфонов, предназначенных для компенсации температурного расширения масла [17]. После замены сильфонов и доливки масла отказы ТТ этого типа на некоторое время прекратились. Однако, спустя некоторое время, отказы повторились, в том числе, в классе напряжения 330 кВ, и руководство ПАО «ФСК ЕЭС» приняло решение об исключении применения ТТ серии ИМВ в проектах строительства и реконструкции своих объектов, оставив более сотни уже установленных аппаратов в эксплуатации.

Эти события стимулировали продолжение исследований. Было предположено, что одной из возможных причин отказов ТТ могли быть высокочастотные перенапряжения, сопровождающие коммутации шин распределительных устройств разъединителями. Более того, было предположено,

что коммутационные перенапряжения, опасные для изоляции сами по себе и повышенной амплитудой, и высокой частотой, могут, к тому же, возбуждать свободные колебания с резонансной частотой внутри оборудования. Особенность конструкции ТТ ИМВ 550, состоит в том, что первичная обмотки из-за большой длины обладает заметной индуктивностью (5 мкГн). Так как ёмкость изоляции обмотки равна 1250 пФ, то при воздействии напряжения с крутым фронтом внутри обмотки действительно могут возникнуть резонансные повышения напряжения, вызывающие ускоренное старение изоляции ТТ.

Сложившаяся ситуация придала новый импульс совершенствованию профилактических испытаний и непрерывному мониторингу изоляции ТТ. Большую роль в этом направлении сыграли работы ОРГРЭС, ВЭИ, ВНИИЭ, СибНИИЭ, ЗТЗ-Сервис и их сотрудников: С.А. Бажанова, П.М. Сви, В.П. Вдовико, В.Н. Осотова, В.А. Русова и др. Большой вклад в понимание свойств трансформаторного масла как важнейшего компонента изоляции внесли Р.А. Липштейн, Б.В. Ванин, В.В. Соколов, Л.А. Дарьян, Д.В. Шуварин, М.Ю. Львов и др. Однако поиск новых методов контроля изоляции ТТ и её компонентов продолжается.

Подводя итог сказанному, подчеркнём, что выявление причин повреждений и предупреждение отказов ТТ играет важную роль в обеспечении нормального функционирования процесса генерации и передачи электрической энергии. Поэтому исследования, направленные на решение указанных проблем, сохраняют свою **актуальность**.

**Объектами исследования** выбраны трансформаторы тока ИМВ 550.

**Предметом исследования** являются внутренние свободные колебания с резонансной частотой и методы диагностирования изоляции первичной обмотки.

**Целью работы** является исследование условий эксплуатации и повышение надежности измерительных трансформаторов тока сверхвысокого напряжения.

Для достижения цели в работе ставились и решались следующие научно-технические **задачи**:

- ~ с использованием современных программных продуктов актуализировать расчётные данные в методических указаниях по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений;
- ~ провести анализ и сопоставление расчётных и экспериментальных данных по напряжениям и токам переходных процессов, сопровождающих коммутации ячеек с ТТ на примере ячеек ОРУ - 500 кВ подстанции «Итатская – 1150 кВ»;
- ~ выполнить измерения амплитудно-частотной и переходной характеристик реального ТТ ИМВ 550; синтезировать на основе этих данных простейшую схему замещения ТТ для включения её в расчёты коммутационных перенапряжений;
- ~ создать макет первичной обмотки ТТ ИМВ 550 и исследовать распределения напряжения вдоль витка и обкладок на импульсном и переменном напряжениях на резонансной и близкой к ней частотах;
- ~ синтезировать математическую модель макета, используя для настройки экспериментальные данные по распределению напряжения по длине и слоям изоляции;
- ~ на основе полученного верификационного опыта синтезировать математическую модель первичной обмотки реального ТТ и с её помощью провести расчёты внутренних перенапряжений, возникающих в изоляции при коммутациях разъединителями;
- ~ исследовать возможности метода диэлектрической спектроскопии для оценки влагосодержания бумажной изоляции ТТ, исследовать процессы изменения структуры и свойств трансформаторного масла и состав продуктов его разложения.

**Методы исследования.** В процессе выполнения исследований проводился анализ и обобщение литературных данных по тематике исследований, физическое и математическое моделирование трансформатора тока, экспериментальные измерения в лаборатории и в условиях эксплуатации.

**Научная новизна** работы характеризуется следующими новыми научными положениями:

1. Экспериментально доказан факт образования свободных колебаний с

резонансной частотой в первичной обмотке трансформатора тока класса напряжения 500 кВ при коммутациях разъединителем шин присоединения.

2. Разработана адекватная математическая модель первичной обмотки и обкладок изоляции конденсаторного типа трансформатора тока, в результате итерации экспериментальных и расчетных процедур.

3. Впервые установлено, что перенапряжение максимальной амплитуды формируются в средней части обмотки и в первом слое изоляции.

4. Предложено введение в объём обязательных физико-химических анализов трансформаторного масла параметра “перекисное число” для проверки масла на устойчивость к окислению.

**Теоретическая значимость** работы заключается в демонстрации возможностей математического моделировании первичной обмотки трансформатора тока схемой замещения с распределёнными ёмкостно-индуктивными элементами.

**Практическая значимость** результатов работы заключается в использовании при диагностировании изоляции методов диэлектрической спектроскопии и оценки перекисного числа трансформаторного масла, так как данный параметр обладает наибольшей чувствительностью к процессам деградации и окисления масла, о чем получен акт внедрения от 30.05.2013 г., выданный Новосибирской СПБ филиала ОАО «ФСК ЕЭС» - Электросетьсервис.

Разработанные математическая и физическая модели трансформатора тока ИМВ-550 позволяют проводить исследования по оценке коммутационных перенапряжений и распределению напряжения по слоям и вдоль обмотки данного типа трансформатора, о чем получен акт внедрения от 22.08.2016 г., выданный федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Коммутации разъединителями генерируют высокочастотные перенапряжения, которые воздействуя на трансформатор тока, возбуждают в первичной обмотке внутренние свободные колебания с резонансной частотой.

2. Результаты математического и физического моделирования трансформатора тока ИМВ 550, которые показывают неравномерное распределение напряжения по слоям изоляции первичной обмотки на резонансной частоте. Максимальные напряжения возникают в средней части слоя изоляции между проводником и первой обкладкой. Пробой одного из слоев изоляции может привести к непропорциональному усилению неравномерности распределения импульсного напряжения по слоям изоляции и, соответственно, ускоренному старению изоляции.

3. Результаты химического анализа импортного масла Nitro 11GX, которые показывают более высокое содержание ароматических соединений, в сравнении с российским маслом ГК, и поэтому при нарушении герметичности, его деградация происходит быстрее, и с большей вероятностью образования Х-воска, состоящего из олигомерных производных углеводородов с перекисными и карбонильными группами с молекулярной массой не менее 1500 а.е.м.

**Достоверность** экспериментальных результатов обеспечена применением в поверенных измерительных приборах и стандартизованных методик физико-химического и хроматографического анализа жидких диэлектриков, а достоверность расчётов – применением лицензионного программного обеспечения. Обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждена публикациями и обсуждениями результатов исследований на научно-технических форумах.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждались на научных семинарах филиала ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» - Новосибирской СПБ и кафедры «Техники и электрофизики высоких напряжений» НГТУ; на XVI международной и практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», г. Томск, апрель 2010; на 6-й конференции по диагностированию электроустановок, г.

Пермь, март 2012; на 8-м и практическом семинаре Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электроустановок, г. Тюмень, апрель 2013; на международных конференциях «Электрическая изоляция», г. С.-Петербург, июнь 2010 и «Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы », г. Екатеринбург, сентябрь 2010.

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано 8 печатных работ, в том числе 2 научных статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в материалах международных и всероссийских научных конференций и 2 статьи в научных журналах.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованной литературы из 119 наименований и 3-х приложений. Содержание изложено на 159 страницах машинописного текста, который поясняется 81 рисунком и 14 таблицами.

# ГЛАВА 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

## 1.1 Общие сведения

Измерительный трансформатор тока (ТТ) – устройство, предназначенное для преобразования первичного тока в такой выходной сигнал, информативные параметры которого функционально связаны с информативными параметрами первичного тока. При нормальных условиях работы выходной ток ТТ практически пропорционален первичному току, и, при правильном включении, сдвинут относительно него по фазе на угол, близкий к нулю. В ТТ высокого напряжения первичная обмотка изолирована от вторичных (земля) на полное рабочее напряжение. Вторичные обмотки ТТ предназначены для измерений и для релейной защиты и управления. Один конец каждой вторичной обмотки обычно заземляется.

ТТ – один из самых распространённых видов электротехнического оборудования [1,2]. При создании ТТ используются различные физические явления, но наибольшее распространение получили электромагнитные трансформаторы.

Целесообразно разделять ТТ в зависимости от уровня напряжения, определяющего конструкцию, а иногда и принцип действия ТТ. С учётом применяемых в России номинальных напряжений различают ТТ низкого (номинальное напряжение до 1000 В) и высокого напряжения (1 кВ и выше).

Все трансформаторы тока - и для измерений, и для защиты, можно классифицировать по следующим основным признакам.

По роду установки:

- для работы на открытом воздухе;
- для работы в закрытых помещениях;
- для встраивания в полости электрооборудования;
- для специальных установок (в шахтах, на судах, электровозах и т. д.)

- По способу установки:
- проходные ТТ, предназначенные для использования в качестве ввода и устанавливаемые в проёмах стен, потолков или в металлоконструкциях;
- опорные ТТ, предназначенные для установки на опорной плоскости;
- встраиваемые ТТ, т. е. устанавливаемые в полости электрооборудования.

По числу коэффициентов трансформации: с одним коэффициентом трансформации и с несколькими коэффициентами трансформации.

По числу ступеней трансформации: одноступенчатые и каскадные (многоступенчатые), т. е. с несколькими ступенями трансформации тока.

По выполнению первичной обмотки: одновитковые (без и с собственной первичной обмоткой; одновитковые ТТ, не имеющие собственной первичной обмотки, выполняются встроенными, шинными или разъёмными и многовитковые.

По роду изоляции между первичной и вторичной обмотками ТТ изготавливаются с твёрдой (фарфор, литая изоляция, прессованная изоляция); с вязкой (заливочные компаунды); с комбинированной (бумажно-масляная, конденсаторного типа) или газообразной (воздух, элегаз) изоляцией.

Основными параметрами и характеристиками трансформатора тока в соответствии с [3 – 5] являются:

1. Номинальное напряжение – действующее значение линейного напряжения, при котором предназначен работать ТТ. Для отечественных ТТ принята следующая шкала номинальных напряжений, кВ:

0,66; 6; 10; 15; 20; 24; 27; 35; 110; 150; 220; 330; 500; 750; 1150.

2. Номинальный первичный ток  $I_{1Н}$ –ток, проходящий по первичной обмотке, при котором предусмотрена продолжительная работа ТТ. Для отечественных ТТ шкала номинальных первичных токов занимает диапазон от 1 до 40000 А.

3. Номинальный вторичный ток  $I_{2Н}$ – ток, проходящий по вторичной обмотке, равный 1 или 5 А, причём ток 1 А допускается только для ТТ с номинальным первичным током до 4000 А.

4. Вторичная нагрузка  $Z_{2H}$  соответствует полному сопротивлению внешней вторичной цепи ТТ, выраженному в Омах, с указанием коэффициента мощности. Вторичная нагрузка может также характеризоваться полной мощностью в вольтамперах, потребляемой ею при данном коэффициенте мощности и номинальном вторичном токе.

Вторичная нагрузка с коэффициентом мощности  $\cos\varphi_2 = 0,8$ , при которой гарантируется установленный класс точности ТТ или предельная кратность первичного тока относительно его номинального значения, называется номинальной вторичной нагрузкой ТТ,  $Z_{2H.НОМ}$ .

Для отечественных трансформаторов тока установлены следующие значения номинальной вторичной нагрузки  $S_{2H.НОМ}$ , ВА (при  $\cos\varphi = 0,8$ ): 1; 2; 2,5; 3; 5; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75; 90; 100; 120.

Соответствующие значения номинальной вторичной нагрузки (в омах) определяются выражением:  $Z_{2H.НОМ} = S_{2H.НОМ} / I_{2H}^2$ .

5. Коэффициент трансформации ТТ равен отношению первичного тока ко вторичному току.

6. Стойкость ТТ к механическим и тепловым воздействиям характеризуется током электродинамической стойкости и током термической стойкости.

Ток электродинамической стойкости  $I_D$  равен наибольшей амплитуде тока короткого замыкания за все время его протекания, которую ТТ выдерживает без повреждений, препятствующих его дальнейшей работе. Электродинамическая стойкость может характеризоваться также кратностью КД, представляющей собой отношение тока электродинамической стойкости к амплитуде номинального первичного тока.

Ток термической стойкости  $I_{ТТ}$  равен наибольшему действующему значению тока короткого замыкания за промежуток  $t$ , которое ТТ выдерживает в течение всего промежутка времени без нагрева токоведущих частей до температур, превышающих допустимые при токах короткого замыкания, и без повреждений, препятствующих его дальнейшей работе.

Термическая стойкость может характеризоваться кратностью тока термической стойкости, представляющей собой отношение тока термической стойкости к действующему значению номинального первичного тока.

Между токами электродинамической и термической стойкости должны быть следующие соотношения: для ТТ на номинальные напряжения 330 кВ и выше  $I_{\text{д}} \geq 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{T}}$  или  $I_{\text{д}} \geq 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{2\text{T}}$ ; для ТТ на номинальные напряжения до 220 кВ

$$I_{\text{д}} \geq 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{T}} \text{ или } I_{\text{д}} \geq 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3\text{T}} .$$

Температура токоведущих частей ТТ при токе термической стойкости не должна превышать: 200 °С для токоведущих частей из алюминия; 250 °С для токоведущих частей из меди и её сплавов, соприкасающихся с органической изоляцией или маслом, и 300 °С для токоведущих частей из меди и её сплавов, не соприкасающихся с органической изоляцией или маслом. При определении указанных значений температуры следует исходить из начальных её значений, соответствующих длительной работе трансформатора тока при номинальном токе. Значения токов электродинамической и термической стойкости ТТ государственным стандартом не нормируются. Однако они должны соответствовать электродинамической и термической стойкости других аппаратов высокого напряжения, устанавливаемых в одной цепи с трансформатором тока.

7. Механическая нагрузка определяется давлением ветра со скоростью 40 м/с на поверхность трансформатора тока и тяжением подводящих проводов (в горизонтальном направлении в плоскости выводов первичной обмотки), которое должно быть не менее 500 Н — для ТТ до 35 кВ включительно; 1000 Н — для ТТ на 110—220 кВ; 1500 Н — для ТТ на 330 кВ и выше.

При проектировании ТТ помимо этих параметров должны учитываться некоторые дополнительные требования к конструкции. Например, маслonaполненный ТТ должен иметь маслорасширитель (компенсатор) и указатель уровня масла. Вместимость маслорасширителя должна обеспечивать наличие масла при всех режимах работы трансформатора тока – от отключённого

состояния до нормированной токовой нагрузки – и при колебаниях температуры окружающего воздуха, установленных для данного климатического района. В трансформаторах тока на номинальные напряжения 330 кВ и более обязательно должна быть предусмотрена защита масла от увлажнения, например, посредством сифонов.

С учётом направленности данной работы рассмотрим далее только маслonaполненные ТТ открытой установки, которые производились в СССР [6–11].

В рымовидной конструкции ТТ типа ТФРМ (ТРН) (рисунок 1.1а) основная бумажная изоляция с промежуточными конденсаторными обкладками накладывается на комплект вторичных обмоток с трубой-подставкой, т.е. внутренняя изоляция имеет рымовидную форму.

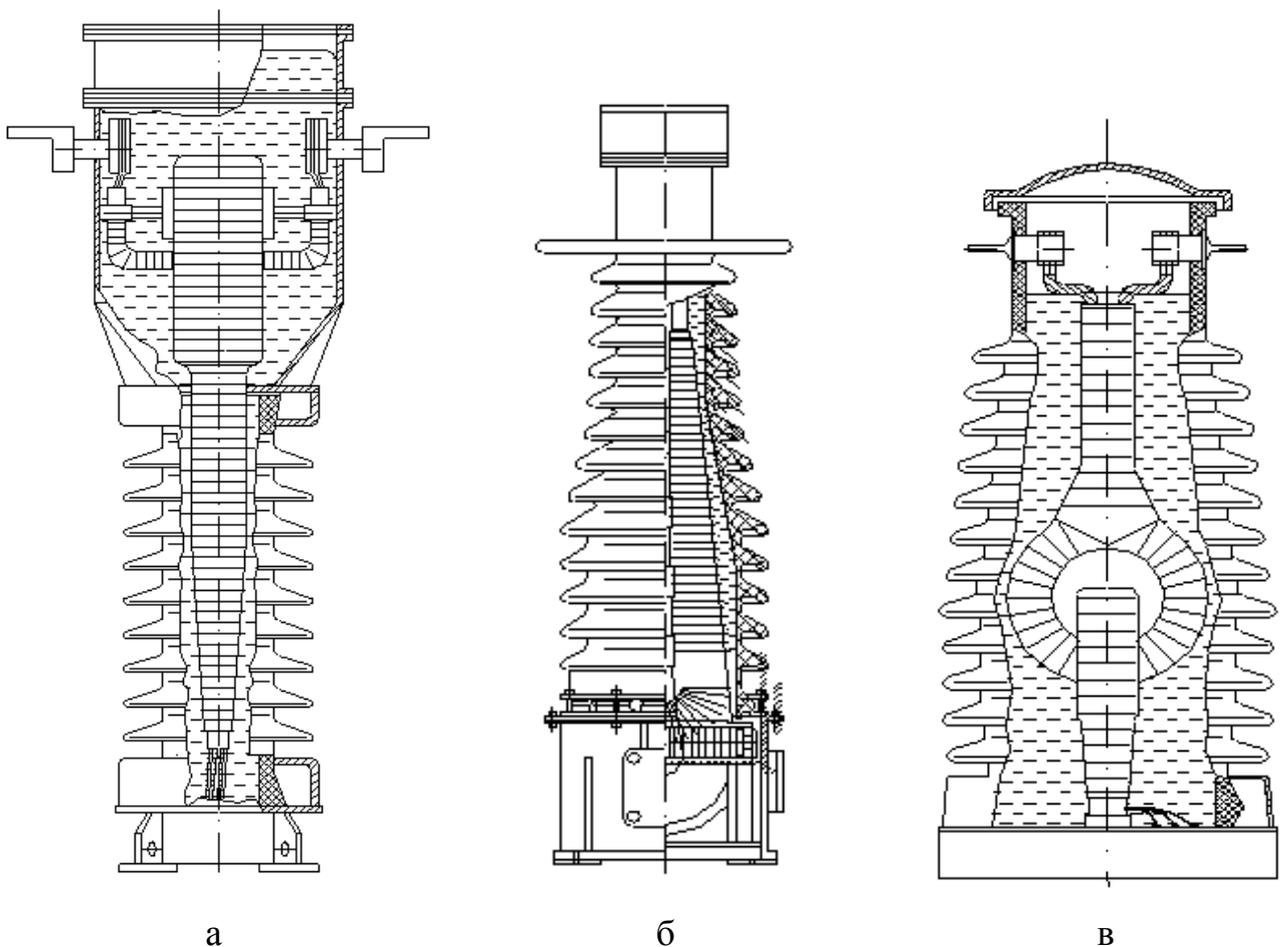


Рисунок 1.1 – Общий вид маслonaполненных трансформаторов тока серии ТФЗМ

Допустимая рабочая напряжённость составляет (4,5 – 5) кВ/мм. У ТФРМ контролируется основная изоляция между потенциальной обкладкой, соединённой с первичной обмоткой, и последней "0" обкладкой, - промежуток С1, а также промежуток "0–обкладка – цоколь", заземляемый при работе. Некоторые характеристики изоляционных промежутков ТФРМ приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики изоляции ТТ серии ТФРМ

Характеристики	Класс напряжения, кВ		
	330	500	750
Ёмкость основной изоляции С1, пФ	850 – 900	1020 – 1100	
Строение основной изоляции	11 слоёв, 12 обкладок	16 слоёв, 17 обкладок	Ступень – как ТТ 330 кВ

Кольцевая часть изоляции и обмотки располагается в маслорасширителе. До 1986 г. ТФРМ заливались маслом марки Т-750, затем – только маслом ГК. ТФРМ имеют герметичное исполнение. Изменения в конструкции узла герметизации и масляного пространства над тором, являются одним из факторов влияния на снижение надёжности ТФРМ. Роль внешней изоляции выполняет фарфоровая покрывка. ТФРМ класса напряжения 330 кВ и 500 кВ – одноступенчатые, 750 кВ – двухступенчатые. Все ТТ этой серии имеют номинальные токи более 2 кА.

ТТ типа ТФУМ-330АУ1 (до 1983 года имел обозначение ТФКН-330) представляет собой опорную конструкцию с U-образной первичной обмоткой, которая расположена внутри фарфоровой покрывки и металлического бака, заполненных трансформаторным маслом марки ТКп (рисунок 1.1б).

ТФКН изготавливались в негерметичном исполнении, ТФУМ – в герметичном. Основная изоляция накладывается на первичную обмотку и выполняется из лент кабельной бумаги, разделённых конденсаторными обкладками из алюминиевой фольги на 14 основных слоёв по 3,6 мм каждый. Расчётная напряжённость электрического поля изоляции (3,5 – 4) кВ/мм. Поверх 14-й обкладки наложены: тонкий слой кабельной бумаги и заземляемая конденсаторная обкладка (15-я обкладка). Последняя и предпоследняя обкладки в необходимых случаях могут быть использованы для измерения напряжения, в

противном случае они заземляются. На ТФУМ выводится только последняя обкладка, т.е. можно контролировать промежуток СЗ. Ёмкости  $C1 = (700 - 900)$  пФ,  $C3 \approx 2000$  пФ.

ТТ серии ТФЗМ (старое обозначение ТФНД), выпускаются в одноступенчатом исполнении (35, 110, 150 и 220 кВ) и в двухступенчатом исполнении класса напряжения 500 кВ (ТФНКД). На рисунке 1.1в показан общий вид маслонаполненного ТТ серии ТФЗМ 110 кВ в разрезе. Конструктивно ТФЗМ в одноступенчатом исполнении состоит из первичной и нескольких вторичных обмоток, помещённых в фарфоровую крышку, заполненную трансформаторным маслом марки ТКп. Изоляция (ленты кабельной бумаги) нанесена поровну на первичную и вторичные обмотки, поэтому рабочее напряжение распределяется равномерно по изоляции обмоток. Расчётная напряжённость электрического поля бумажно-масляной изоляции обмоток не превышает 3 кВ/мм. Первичная обмотка выполнена из двух или четырёх секций, соединяемых в зависимости от необходимого коэффициента трансформации тем или иным способом.

Каскадный ТФЗМ с номинальным напряжением 500 кВ состоит из двух отдельных ступеней, имеет один общий маслорасширитель, а верхняя и нижняя ступени соединяются маслопроводом. Измерениями  $tg\delta$  основной изоляции в этой конструкции ТТ можно проконтролировать только небольшую часть бумажно-масляной изоляции между первичной и вторичной. К тому же, из-за малой ёмкости этого изоляционного промежутка (около 100 пФ) измерения не очень точны.

Для ТТ описанных выше типов наиболее характерными причинами повреждения являлись дефекты изоляции (56%) и разгерметизация (30,5%). Анализ повреждаемости трансформаторов тока типа ТФРМ на классы напряжения (330 – 750) кВ показал, что причиной отказов является развитие ионизационных процессов в изоляции ТТ вследствие недостаточно надёжной конструкции узла герметизации. Как следствие, в изоляцию попадают атмосферный воздух и влага, которые инициируют процессы развития пробоя

изоляции как электрического, так и теплового характера. Для ТТ типа ТФУМ 70 % повреждений происходит через (15 – 20) лет эксплуатации, причём в летний период: в южных районах летние отказы составляют 93 %. Анализ повреждений показал, что почти 80% повреждений ТТ приходится на конструкции с открытым дыханием. Механизм повреждений связан с ростом диэлектрических потерь и ионизационными процессами в изоляции, что приводит к ускоренному тепловому и электрическому старению и в конечном итоге – к пробоям. Итогом повреждений в большинстве случаев становились взрывы ТТ, сопровождавшиеся разлётом осколков фарфоровых покрышек на десятки метров и разрушением соседнего оборудования.

Нередко такие аварии приводили к большим недоотпускам электрической энергии и экономическому ущербу. Особенно показателен в этом смысле был опыт эксплуатации оборудования на подстанции «Итатская 1150 кВ». Эта подстанция отличается, с одной стороны, высокой системной значимостью в виду ее центрального расположения в схеме сети ОЭС Сибири и, с другой стороны, сокращёнными габаритами открытого распределительного устройства 500 кВ. Последние привели к росту ёмкости шин, снижению их волновых сопротивлений и утяжелению переходных процессов при коммутациях.

На начало 2003г. на подстанции эксплуатировалось в общей сложности 69 фаз ТТ, в том числе 7 фаз ТТ типа ТРН-500, 50 фаз ТТ типа ТФРМ-500 и 12 фаз ТТ типа ТФЗМ-500. Все они были введены в эксплуатацию в период с 1982 по 1996 годы. За период с 1990 по 2001 годы в результате пробоя главной изоляции, сопровождающегося взрывным разрушением, повредилось 11 ТТ типа ТФРМ-500. Ещё 2 ТТ этого же типа были сняты с эксплуатации по результатам профилактических испытаний. Наблюдалась избирательная повреждаемость ТТ разных годов выпуска (см. таблицу 1.2 и рисунок 1.2). Основное количество повреждений (более 60%) было зафиксировано для ТТ 1988 – 89 гг. выпуска. Для трансформаторов 1981 и 1987 гг. зафиксированы единичные случаи, а ТТ 1992 г. выпуска (3 случая) повреждались только при установке в эксплуатацию после длительного периода хранения на складе 5÷7 лет.

С 2000г. началось масштабное техническое перевооружение объектов ОАО «ФСК ЕЭС» с заменой морально и физически устаревшего на новое надёжное и не требующее обслуживания в течение всего срока службы оборудование. Выбор оборудования проводится на конкурсной основе с учётом отношения «цена – качество».

Следует отметить, что доля трансформаторов тока, была доминирующей в общих поставках электротехнического оборудования зарубежных производителей. Исторически одними из первых на российском энергетическом рынке появились ТТ фирмы Pasonny Villa [12], однако из-за низкой эксплуатационной надёжности они были быстро вытеснены с российского рынка.

Таблица 1.2 – Данные по опыту эксплуатации и повреждаемости трансформаторов тока ТФРМ-500 (ТРН-500) на ПС «Итатская-1150 кВ»

Показатели наработки и повреждаемости ТТ	ТТ годов, выпуска 19... гг.					Всего
	81-84	87	88	89	91-92	
Количество ТТ в эксплуатации на начало 2003 г., шт.	20	16	9	3	9	57
Объем опыта эксплуатации, трансформаторов × лет	397	246	143	42	73	901
Количество ТТ, вышедших из строя, шт.	1	1	6	2	3	13
Среднее время наработки до повреждения, лет	18,5	11,3	4,8	1,9	1,5	7,6
Интенсивность отказов, $10^{-2}$ /лет	0,25	0,41	4,20	4,78	4,09	1,48

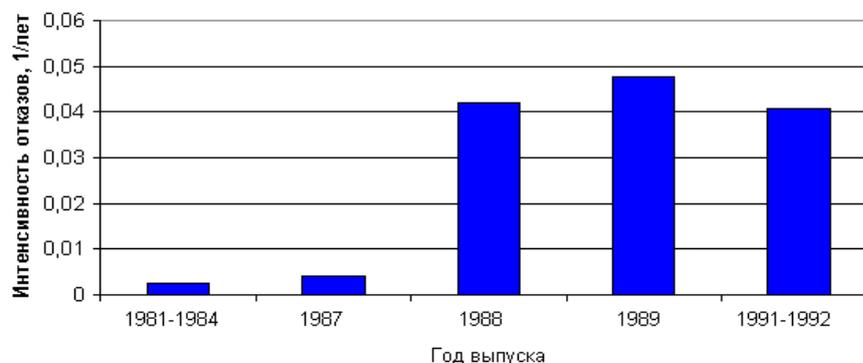


Рисунок 1.2 – Данные о повреждаемости трансформаторов тока ТФРМ-500 разных годов выпуска, работавших на ПС «Итатская-1150 кВ»

Для замены ТТ на ПС «Итатская – 1150 кВ» были выбраны маломасляные измерительные трансформаторы тока серии ИМВ компании АВВ. Дизайн ТТ этой серии, заимствует принцип регулирования электрического поля вдоль внешней изоляции у вводов и остаётся неизменным на протяжении 60 лет. Отметим, однако, что за этот период ТТ ИМВ550 заметно сократил свои габариты (рисунок 1.3).

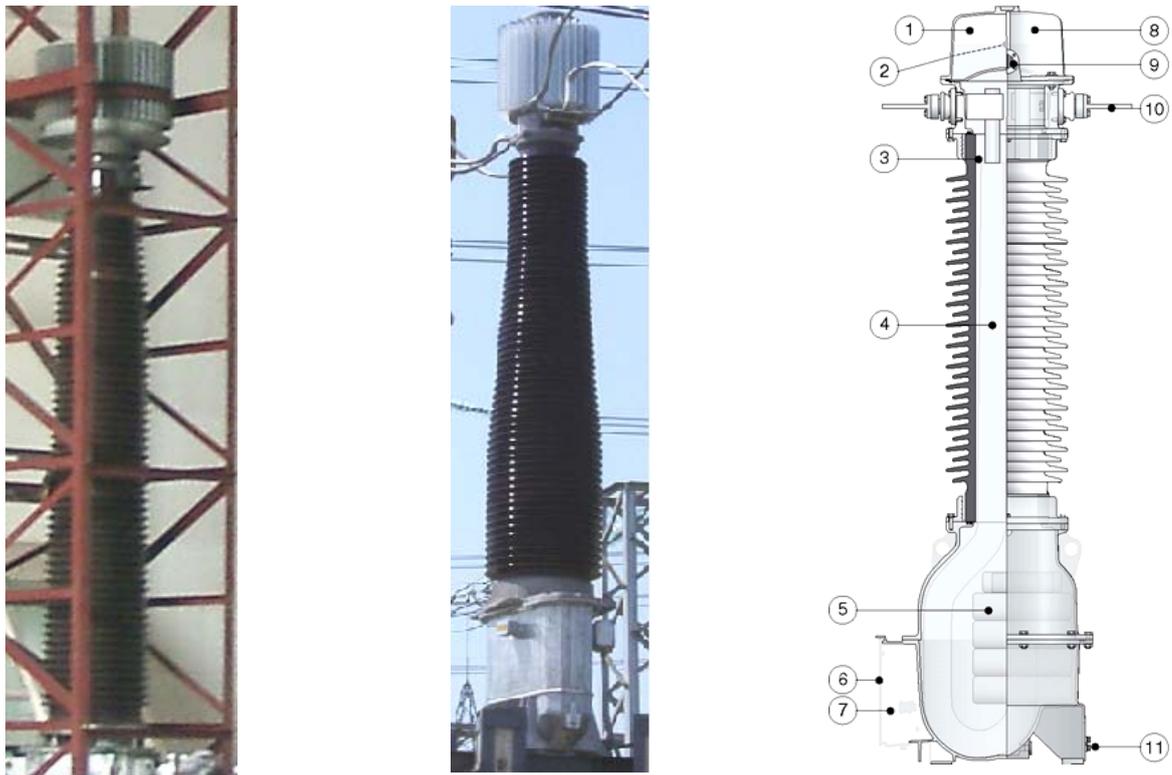


Рисунок 1.3 – Внешний вид трансформатора тока ИМВ550 1980-х (слева, в транспортной таре) и 2000-х годов выпуска (в середине) и его эскиз(справа):

1– газовая подушка; 2 – крышка отверстия для заливки масла (не показано);  
 3 – кварцевый песок; 4 – токопровод с бумажной изоляцией; 5 – сердечники/вторичные обмотки; 6 – коробка вторичных выводов; 7 - емкостной вывод (поставляется под заказ); 8 – расширительная система; 9 – указатель уровня масла; 10 – вывод первичной обмотки; 11 – вывод заземления

Трансформаторы имеют бактовую конструкцию с первичной обмоткой U - образной формы из одного или нескольких параллельных медных или алюминиевых проводников с конденсаторной изоляцией и песочно-масляным заполнением. Изоляция выполнена из высокопрочной бумаги с конденсаторными

обкладками. Последняя обкладка соединена с заземлённым баком. Для контроля  $tg\delta$  бумажной изоляции трансформатор может поставляться с ёмкостным выводом, который через изолятор в стенке бака соединён с предпоследней конденсаторной обкладкой.

Внутреннее пространство трансформатора заполнено очищенным кварцевым песком (примерно на 60% от общего объёма) и залито дегазированным минеральным маслом, соответствующим классу II по МЭК 296. Возможно, применение масла марки ГК по ТУ 38. 101. 1025.

Вторичные обмотки расположены в алюминиевом баке, служащем основанием трансформатора. На крышке бака смонтирован фарфоровый или полимерный изолятор. На верхнем торце изолятора установлена герметичная расширительная система, в которой в качестве компенсирующего элемента применена азотная «подушка». В ТТ на большие токи (3000 – 4000 А) расширительная система выполнена в виде сифона из нержавеющей стали. На корпусе расширительной системы имеется окно для контроля уровня масла и отверстие для заливки масла.

Вторичные обмотки равномерно намотаны на ленточные тороидальные магнитопроводы (керны). Керны обмоток для измерений изготовлены из никелевого сплава, обладающего малыми потерями и низким уровнем насыщения. Керны обмоток для защиты изготовлены из анизотропной электротехнической стали.

Коробка выводов вторичных обмоток расположена на баке трансформатора.

ТТ ИМВ 550 соответствуют стандартам МЭК 60044-1, ГОСТ 7746-2001 и техническим условиям ТУ16-00 1БП.768.011 ТУ. Испытательные напряжения и основные параметры ТТ [13, 14] приведены в таблицах 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3 – Испытательные напряжения ТТ ИМВ 550

Ун.р. , кВ	Испытательные напряжения, кВ				
	50 Гц, 1 мин сух./мокр.	Импульс 1,2/50 мкс	Импульс 250/2500 мкс	Стандартный срезанный импульс	
				Однократный	Многократный
550	680	1800	1230	2070	1080

Таблица 1.4 – Технические характеристики трансформатора тока ИМВ 550

Наименование параметра	Норма
Номинальная частота, Гц	50
Номинальный первичный ток, А	1000 – 4000
Номинальный вторичный ток, А	5 или 1
Количество вторичных обмоток: - для измерений	1
- для защиты	3 или 4
Класс точности обмотки для измерений	0,2 или 0,2S; 0,5 или 0,5S
Класс точности обмоток для защиты	5P или 10P
Номинальная вторичная нагрузка при $\cos\varphi=0,8$ ; ВА:	
- обмотки для измерений	30
- обмоток для защиты	от 30 до 75
Коэффициент безопасности приборов обмотки для измерений	5
Номинальная предельная кратность обмоток для защиты	20
Односекундный ток термической стойкости, ( $I_T$ ), кА, для первичных токов 400 – 4000 А	63
Ток электродинамической стойкости, $kA_{ампл}$	$2,5 \cdot I_T$

ТТ предназначен для эксплуатации в следующих условиях:

- температура окружающей среды: от минус 55 °С до плюс 45 °С;
- относительная влажность воздуха: до 100 % при 25 °С;
- высота установки над уровнем моря: не более 1000 м;
- рабочее положение в пространстве: – вертикальное;
- окружающая среда: атмосфера типа II по ГОСТ 15150-69 (промышленная);
- допустимая механическая нагрузка на выводы первичной обмотки во всех направлениях: 6000 Н, допустимый крутящий момент: 1000 Нм;
- сейсмостойкость при землетрясениях с ускорением 0,5g.

Возможно изменение коэффициента трансформации в соотношении 1:2 за счёт переключения витков первичной или вторичной обмотки. Максимальные габариты составляют 6400×1077×686 мм; общая масса 2900 кг; масса масла 530 кг.

После неудачного опыта эксплуатации (см. п.1.2) на смену этим ТТ пришли ТТ типа СА, выпускаемых фирмой ARTECHE (Испания) [15]. В них главные рабочие узлы (сердечники и обмотки) расположены внутри верхней головной части, выполненной из алюминия и установленной на изоляторе (рисунок 1.4).

Внутренняя изоляция – бумажно-масляная. Трансформаторы герметично закрыты. Данный тип трансформаторов рассчитан на малый объем масла. Изменения объема масла компенсируются одним или несколькими маслорасширителями (сильфонами) из нержавеющей стали, расположенными в головной части. Первичная обмотка состоит из одного или нескольких витков, которые при различных способах подключения обеспечивают широкий диапазон коэффициентов трансформации. Согласно устному опросу служб подстанций предприятий данный тип ТТ эксплуатируется без замечаний.

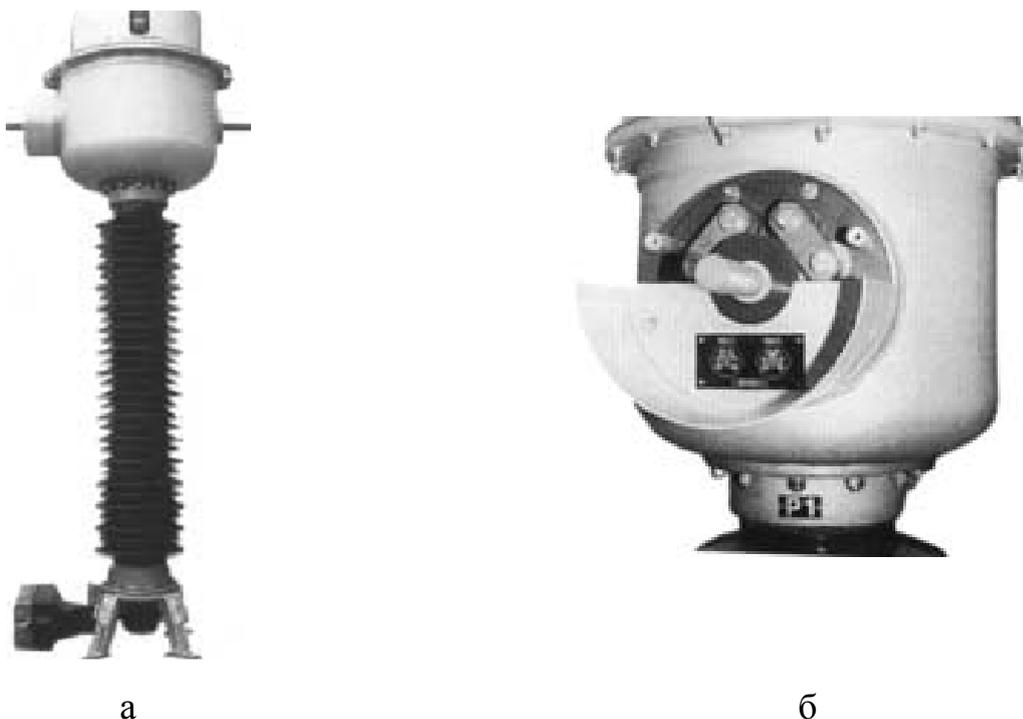


Рисунок 1.4 – Внешний вид трансформатора тока СА (а) и его головной части (б)

## 1.2 Опыт эксплуатации трансформаторов тока серии ИМВ

После частичной замены трансформаторов тока ТФРМ-500 на трансформаторы типа ИМВ 550 в марте 2003 г. произошло аналогичное повреждение уже вновь установленного трансформатора ИМВ 550. Повреждение ТТ сопровождалось неадекватной работой устройств РЗА, что привело к

излишним отключениям присоединений на ПС «Итатская» при локализации аварии.

В дальнейшем трёхлетнем периоде эксплуатации интенсивность отказов новых ТТ более чем на два порядка превысила аналогичный показатель для «среднестатистических» ТТ по данным СИГРЭ. В порядке отступления отметим своеобразие подсчёта отказов, которое практикуется изготовителем. Отказами называется только случаи полного разрушения ТТ в рабочем режиме. Если же аппарат был своевременно, т.е. без разрушения, выведен из работы, то это не считается отказом даже в случае предаварийного состояния. Поэтому статистика отказов, декларируемая производителем, выглядит более чем благополучно.

Кроме того, процент отказов, отнесённых к категории «неизвестная причина», для ТТ на ПС «Итатская» составил 78 % против 23 % для «среднестатистических» показателей СИГРЭ для ТТ. Априори предполагались следующие возможные причины повреждений. Во-первых, к повреждениям могли привести дефекты, связанные с конструкцией или же с нарушением технологии изготовления ТТ. Во-вторых, ненормированные воздействия высокочастотных перенапряжений на ТТ при коммутациях разъединителей. И, в-третьих, это наложение уже перечисленных причин, а именно, повреждение ТТ в результате ненормированных воздействий при наличии заводских технологических дефектов ТТ.

С целью выяснения причин повреждений ТТ на ПС «Итатская – 1150 кВ» и разработки мероприятий по их устранению, а также причин неправильной работы устройств РЗА с трансформаторами нового типа ИМВ 550, был проведён комплекс исследований, результаты которых приведены в [16 – 19].

Установлено что первопричиной отказов было механическое повреждение сильфонов, предназначенных для компенсации температурного расширения масла. В эксплуатации оно приводило к катастрофическому падению давления во внутреннем объёме, вскипанию растворённых в масле газов (которые, в свою очередь, могли появиться при недостаточном прогреве и вакуумировании кварцевого песка или бумажной изоляции) и формированию в пузырьках газа

критических частичных разрядов. Получил адекватное объяснение и механизм газообразования вследствие химического взаимодействия материалов, например, компонентов кварцевого песка или сопутствующих материалов, которые могут попасть в оборудование вследствие особенностей технологического процесса их изготовления. Усугубляющим фактором могли быть резкие перепады температуры окружающей среды, облегчавшие условия для образования пузырьков газа.

После замены сильфонов и доливки масла аварийные отказы ТТ этого типа на подстанции прекратились. Сократилось и общее число отказов, поставленных фирмой в Россию, тем более что производитель изменил конструкцию и стал поставлять ТТ с газовыми подушками в системах компенсации температурного расширения масла. В [20] было выполнено обоснование выбора соотношения объёмов «газовой подушки» и изоляционной жидкости, позволяющего предотвращать опасное снижение давления внутри герметичного аппарата с «газовой подушкой» в условиях резкого уменьшения температуры окружающей среды. Однако отказы ТТ, изготовленных с оптимизированной «газовой подушкой», заставили вернуться к изучению других возможных причин, приводящих к авариям. Сведения о некоторых из произошедших отказов приведены ниже в хронологическом порядке их возникновения.

В апреле 2010 г. на ПС «Восточная 330 кВ» МЭС Северо-Запада произошло повреждение с разрушением ТТ ИМВ 362 (рисунок 1.5а). Данный трансформатор был введён в эксплуатацию в декабре 2006 г. Гарантийный срок эксплуатации (три года) на момент аварии истёк.

В ноябре 2010 г. на ПС «Таврическая 500 кВ» при опробовании нового ТТ типа ИМВ 550 отключилась ВЛ 500 кВ «Экибастузская ГРЭС – ПС «Таврическая». Отключение произошло из-за повреждения, в виде течи масла с песком из фазы В (рисунок 1.5б). ТТ повредился через 18 часов, после ввода в эксплуатацию.



а



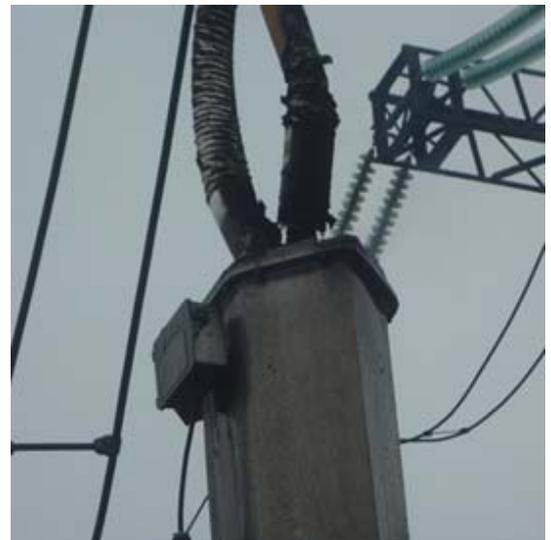
б

Рисунок 1.5 – Взрыв трансформатора тока IMB 362 (а) и течь масла в трансформаторе тока IMB 550 (б)

В ноябре 2011 г. на ПС «Иртышская 500 кВ» произошло возгорание фазы А ТТ IMB 550 (рисунок 1.6а). ТТ находился в эксплуатации 9 дней. В мае 2012 г. на ПС «Западная 330 кВ» МЭС Северо-запада произошло повреждение ТТ IMB 362 (рисунок 1.6б). Гарантийный срок эксплуатации на момент аварии истёк.



а



б

Рисунок 1.6 – Возгорание трансформаторов тока IMB550 (а) и IMB362 (б)

В итоге череды повреждений измерительных трансформаторов тока серии IMB руководство ОАО «ФСК ЕЭС» приняло решение об исключении применения

данного типа ТТ в проектах нового строительства и реконструкции своих объектов (приложение А).

В последнее время, судя по последним обзорам аварийности подстанционного оборудования в «ФСК ЕЭС» (рисунок 1.7), ситуация с измерительными ТТ в некоторой степени нормализовалась. Возможно, что это связано с переходом к новым типам ТТ или с исчезновением приработочных дефектов и профилактическими мероприятиями, которые были проведены с ТТ серии ИМВ.

На тех подстанциях, где ТТ этого типа были установлены, модернизированы системы компенсации температурного расширения масла и проведены доливки масла. Проводится тщательное слежение за состоянием изоляции путём периодического контроля тангенса диэлектрических потерь и ёмкости изоляции при подаче напряжения 10 кВ от постороннего источника.

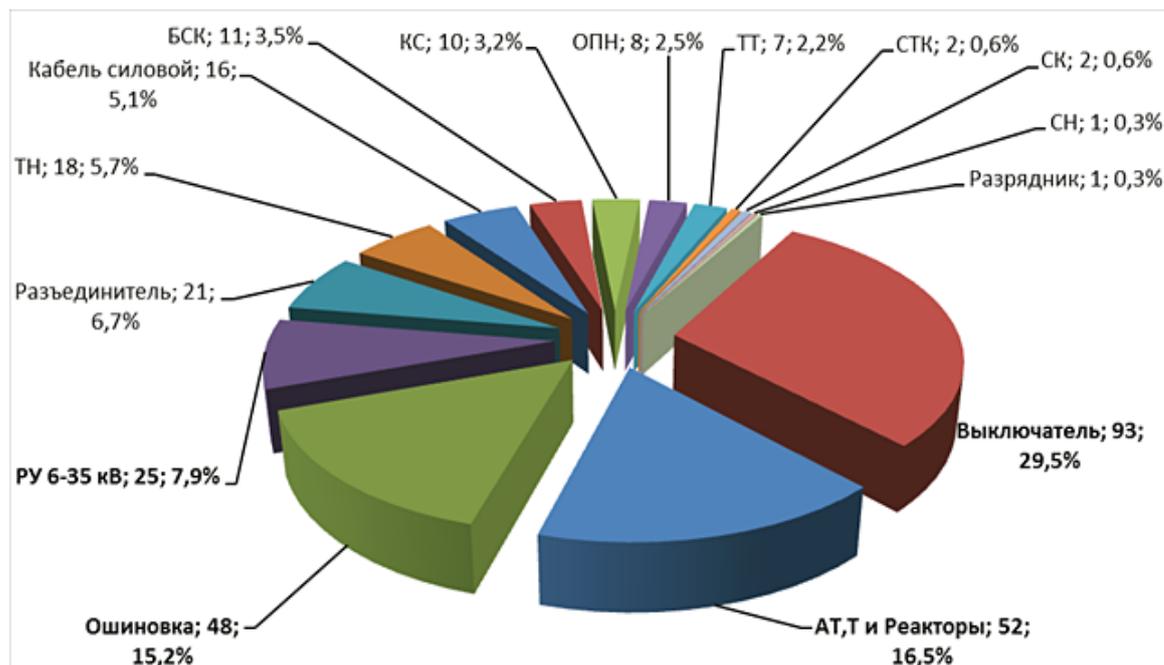


Рисунок 1.7 – Распределение технологических нарушений на основном оборудовании подстанций ПАО «ФСК ЕЭС» по видам отказавшего оборудования за период 01.01 –01.11. 2015 г.

### 1.3 Высокочастотные перенапряжения и внутренние резонансы в подстанционном оборудовании

*Общие сведения.* История исследований высокочастотных переходных процессов в электрических сетях начала свой отсчёт с внешних, т.е. атмосферных перенапряжений. Рассматривалось их воздействие на изоляцию и способы защиты оборудования [21 – 24]. Особо рассматривалось генераторное и трансформаторное оборудование в связи с неравномерным распределением импульсного напряжения вдоль обмоток [25 – 30]. Однако к настоящему времени накопилось немало фактов связи отказов трансформаторного оборудования, в том числе, силовых и измерительных трансформаторов тока, а также вводов высокого напряжения, с внутренними высокочастотными перенапряжениями и токами, которые возникают в сети или внутри оборудования при коммутациях выключателями, особенно вакуумными и элегазовыми [31 – 37], и разъединителями [38, 39].

Наиболее высокие частоты переходных процессов имеют место в элегазовых комплектных распределительных устройствах (КРУЭ) [40 – 45]. В некоторых случаях внешние воздействия также приводят к возникновению резонансных повышений напряжения в отдельных участках схемы энергообъекта. Способы ограничения перенапряжений и подавления высокочастотных переходных процессов приведены в [38, 43, 46 – 49].

*Распределение напряжения в обмотках электромагнитных устройств.* Далее мы рассмотрим более подробно только некоторые из известных работ, наиболее близких к тематике данной работы. Так, например, из многих работ, посвящённых вопросам распределения напряжения, автор выбрал работу авторов [29], потому что в ней результаты расчёта на математической модели дисковой обмотки трансформатора (рисунки 1.8 и 1.9) были подтверждены экспериментальными данными, полученными на макете (рисунки 1.10 и 1.11). Такой же методический приём применялся нами до появления обсуждаемой публикации (см. главу 3).

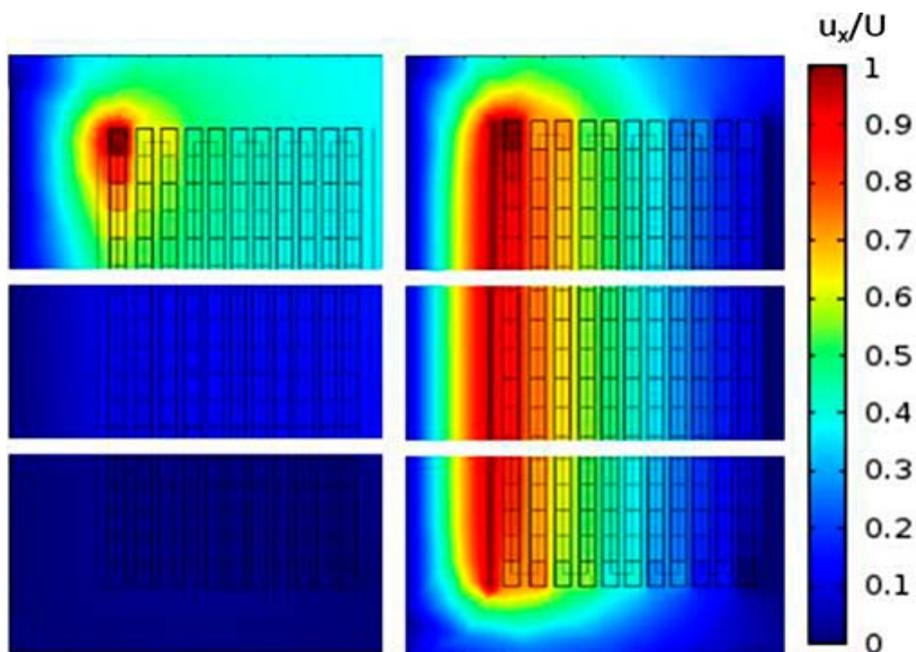


Рисунок 1.8 – Распределение напряжения в дисковой обмотке без экранов (слева) и с электростатическими экранами (справа)

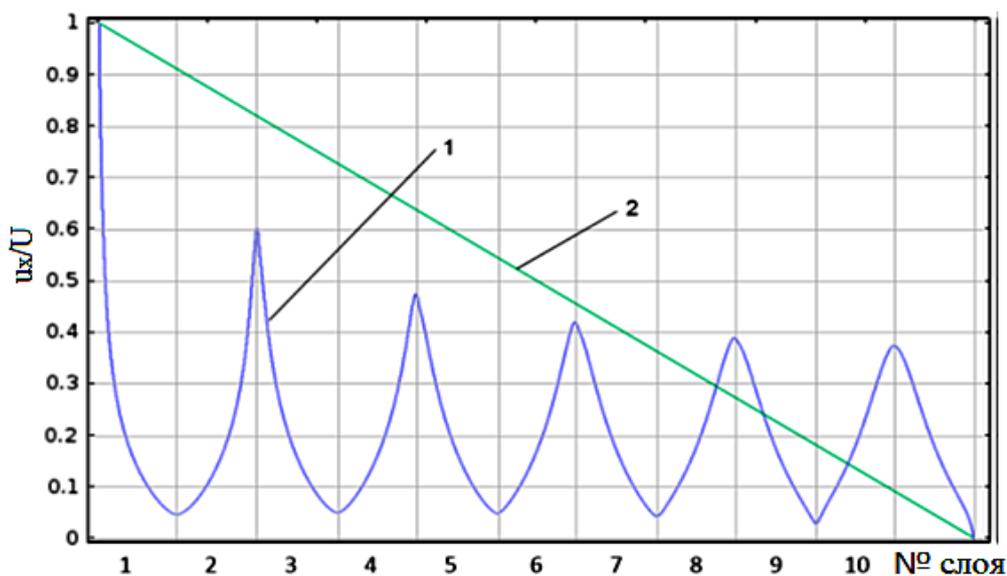


Рисунок 1.9 – Начальное (1) и конечное (2) распределение напряжения вдоль дисковой обмотки силового трансформатора

Из приведённых данных наглядно видно, что в начальные моменты времени распределение напряжения вдоль обмотки неравномерное, а экраны, которые устанавливаются на вводе и конце обмотки в некоторой степени выравнивают распределение напряжения.

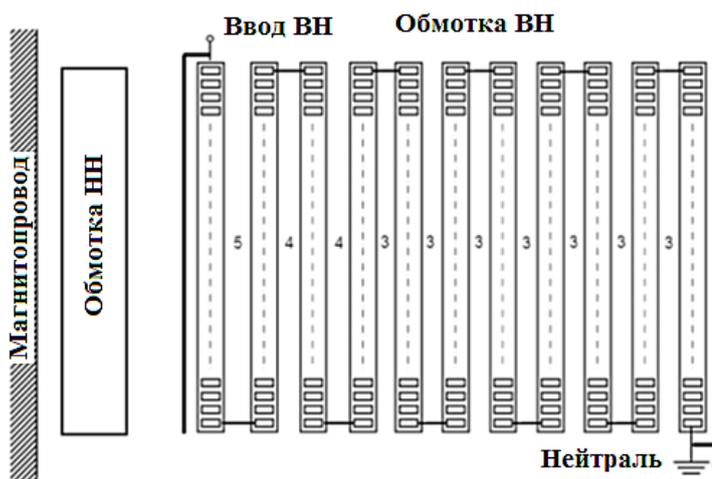


Рисунок 1.10 – Геометрия экспериментальной дисковой обмотки

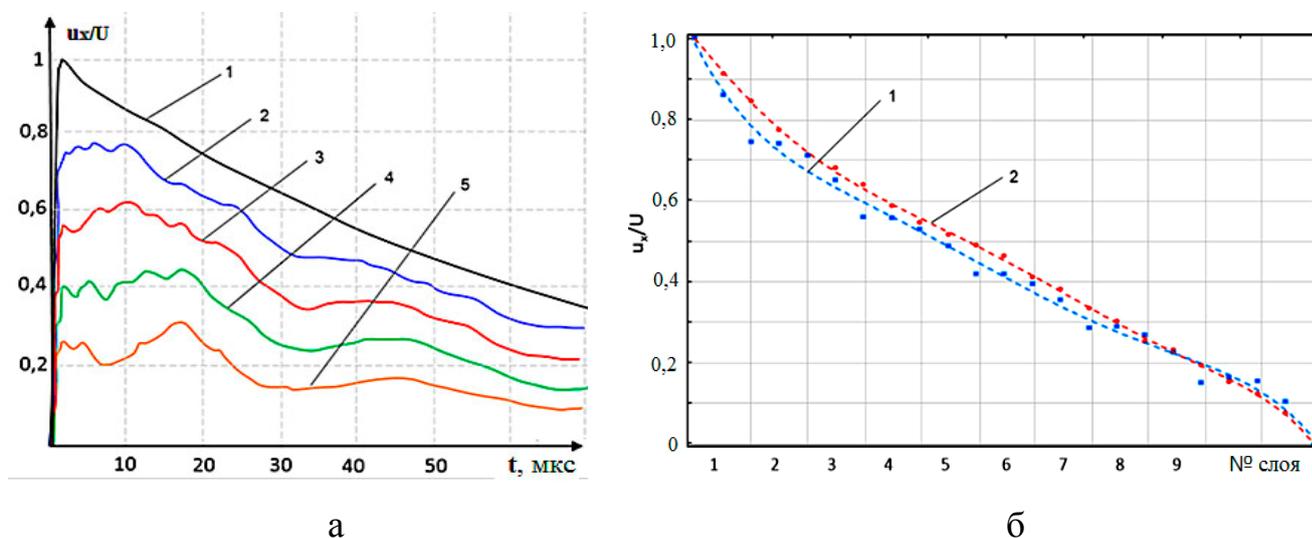


Рисунок 1.11 – Распределение напряжения по длине обмотки: а – осциллограммы напряжения в различных точках обмотки при воздействии на её вход стандартного грозового импульса 1.2/50 мкс: 1 – входное напряжение, 2 – 2-й слой, 3 – 4-й слой, 4 – 6-й слой, 5 – 8-й слой; б – расчётное (1) и экспериментальное (2) распределение напряжения по длине многослойной обмотки

Приведённые результаты не новы. Известно, что при большой скорости изменения напряжения от  $U=0$  до  $U = U_{\text{макс}}$  эквивалентную схему обмотки можно представить цепочкой продольных (межвитковых) ёмкостей  $C_0$  и поперечных  $K_0$  (между витками обмотки и стенкой бака) ёмкостей (рисунок 1.12а).

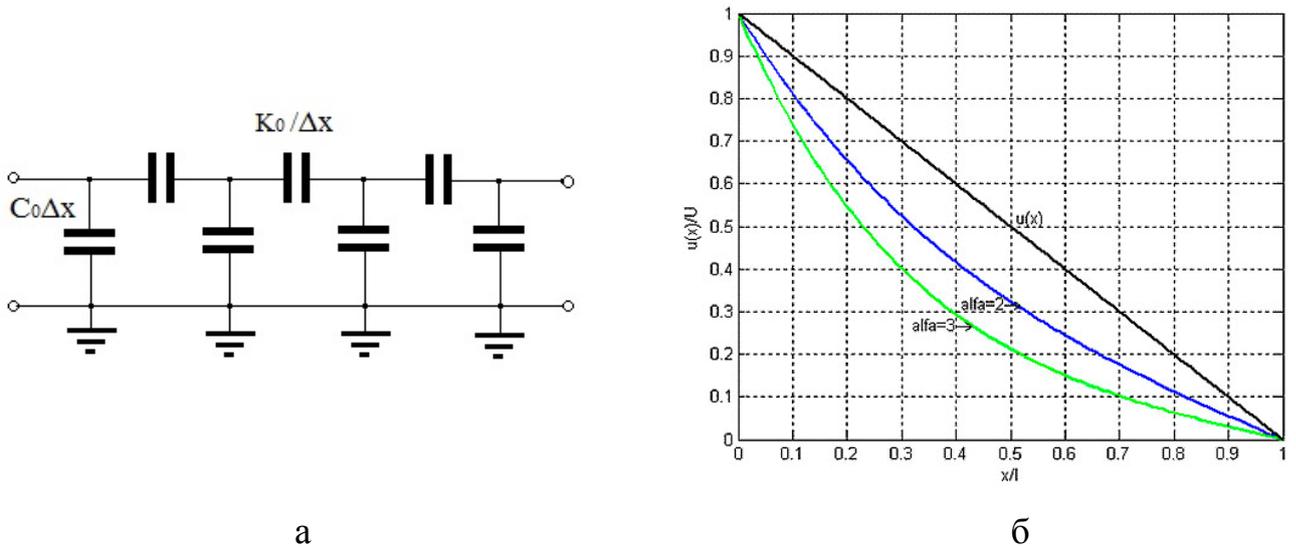


Рисунок 1.12 – Ёмкостная схема замещения обмотки (а) и распределение напряжения (б) вдоль неё

Если допустить, что поперечные ёмкости отсутствуют, то разрядный ток устремится в землю по цепочке продольных ёмкостей, а напряжение набежавшей волны распределится вдоль обмотки равномерно. Наоборот, если допустить отсутствие продольных ёмкостей, то единственным путём протекания разрядного тока на землю будут ёмкости  $K_0$ , особенно ближайшие к началу обмотки. Фактически существуют те и другие ёмкости, и первоначальное распределение напряжения вдоль обмотки определяется кривыми зелёного или синего цвета, приведёнными на рисунке 1.12б.

Заряды и их приращения на элементах схемы на рисунке 1.12а запишутся в виде

$$Q(x) = \frac{k_0}{\Delta x} du(x), \quad \Delta Q(x) = C_0 \Delta x \cdot u(x). \quad (1.1)$$

Перейдя от конечных приращений к бесконечно малым, получим дифференциальные уравнения

$$\frac{dQ}{dx} = k_0 \frac{d^2 u}{dx^2}, \quad \frac{dQ}{dx} = C_0 u. \quad (1.2)$$

Приравнявая в уравнениях (1.2) левые части, получим

$$\frac{d^2 u}{x^2} - \frac{C_0}{k_0} u = 0 \quad (1.3)$$

Решение уравнения (1.3) с точностью до постоянных интегрирования запишется в виде:

$$u(x) = A_1 e^{\alpha_0 x} + A_2 e^{-\alpha_0 x} \quad (1.4)$$

где  $\alpha_0 = \sqrt{\frac{C_0}{k_0}}$ .

Постоянные интегрирования определим с учётом граничных условий

$$u(0) = U, \quad u(\ell) = 0 \quad (\text{обмотка заземлена}). \quad (1.5)$$

При этих граничных условиях

$$A_1 = -U \frac{e^{-\alpha_0 \ell}}{2 \operatorname{sh} \alpha_0 \ell}, \quad A_2 = U \frac{e^{\alpha_0 \ell}}{2 \operatorname{sh} \alpha_0 \ell}. \quad (1.6)$$

Следовательно

$$u(x) = U \frac{[e^{\alpha_0(\ell-x)} - e^{-\alpha_0(\ell-x)}]}{2 \operatorname{sh} \alpha_0 \ell} = U \frac{\operatorname{sh} \alpha_0(\ell-x)}{\operatorname{sh} \alpha_0 \ell}. \quad (1.7)$$

На рисунке 1.12б приведено начальное распределение напряжения вдоль обмотки при различных отношениях погонных ёмкостей на корпус и между витками. Видно, что чем больше ёмкость на корпус, т.е. чем больше величина  $\alpha_0$ , тем более неравномерно распределено напряжение по обмотке в начальный момент времени. Чем круче кривая ёмкостного распределения, тем более высокие перенапряжения могут развиваться в обмотке.

В практическом плане чисто ёмкостное распределение напряжения не имеет места, поскольку, ввиду конечности фронта импульсных волн к моменту достижения максимального значения импульса, часть его уже проникает в обмотку и выравнивает кривую ёмкостного распределения. Поэтому значения перенапряжений снижаются при увеличении длительности фронта импульса. На

рисунке 1.13 приведены значения градиентов в начальном режиме и в стационарном режиме.

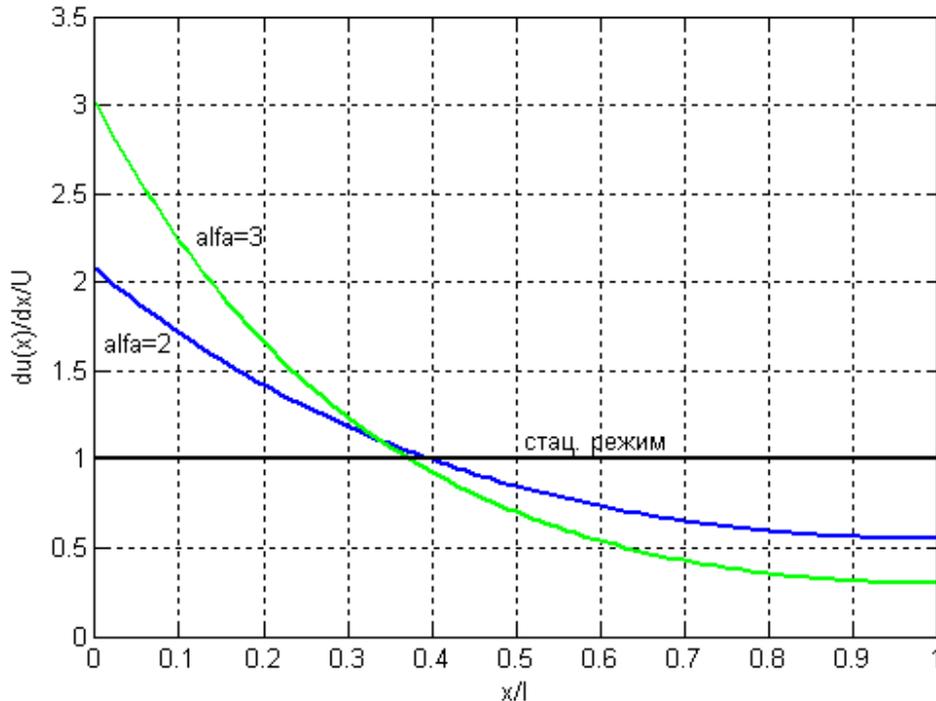


Рисунок 1.13 – Распределение градиента напряжения по обмотке в начальный момент времени и в стационарном режиме

Видно, что градиент напряжения на обмотке ШР существенно превышает градиент в стационарном режиме (при рассмотренных отношениях  $C_0/K_0 = 2...4$  это превышение лежит в диапазоне (2...3) раз.

Известны и способы выравнивания распределения импульсного напряжения по длине обмотки, которые используются в конструкциях обмоток силовых трансформаторов. Выше уже демонстрировалось действие электростатических экранов, установка которых по концам обмотки приводит к увеличению продольной ёмкости и, соответственно, к выравниванию распределения напряжения вдоль обмотки. Кроме экранов в обмотках трансформаторов на напряжение (220 – 500) кВ несколько первых от линейного конца катушек выполняются переплетёнными, а остальная часть катушек имеет непрерывную намотку. В таких обмотках имеет место большой градиент напряжения при грозовых (и коммутационных) импульсах в начале непрерывной части обмотки.

*Воздействие высокочастотных перенапряжений на трансформаторы тока и вводы.* Одно из наиболее близких, по духу и содержанию, к представляемой работе исследование было проведено авторами [39]. Целью исследования было выяснение причины высоких концентраций газов, обнаруженных при хроматографическом анализе газов, растворённых в масле (ХАРГ) ТТ (к сожалению, тип ТТ не указан). Повышенные концентрации газов могли быть связаны с повреждениями изоляции. Так как рабочая напряжённость электрического поля в изоляции не могла привести к повреждениям, было логично предположить, что причиной возможных повреждений были высокочастотные переходные процессы при коммутациях разъединителя. Для оценки перенапряжений были выполнены полевые измерения специально разработанной измерительной системой (рисунок 1.14).

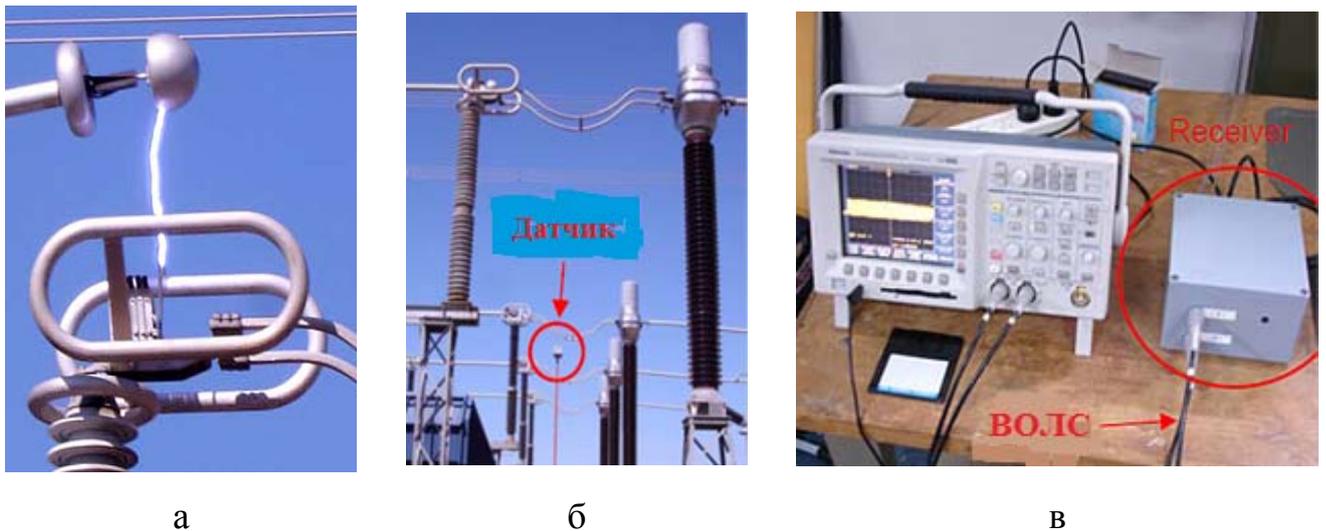


Рисунок 1.14 – Внешний вид искрового пробоя межконтактного промежутка разъединителя (а), датчика напряжения (б) и приёмной аппаратуры (в)

Чтобы избежать больших погрешностей при измерениях тока, измерялись только напряжения на ТТ (рисунок 1.15). Затем, с использованием реальной частотной характеристики ТТ и компьютерного моделирования определялись токи, протекающие через изоляцию ТТ на землю. И, наконец, один из ТТ с высокими концентрациями газов, растворённых в масле, был выведен из эксплуатации и полностью разобран для подтверждения предполагаемого

повреждения изоляции. Результаты осмотра подтвердили правильность решения об отбраковке.

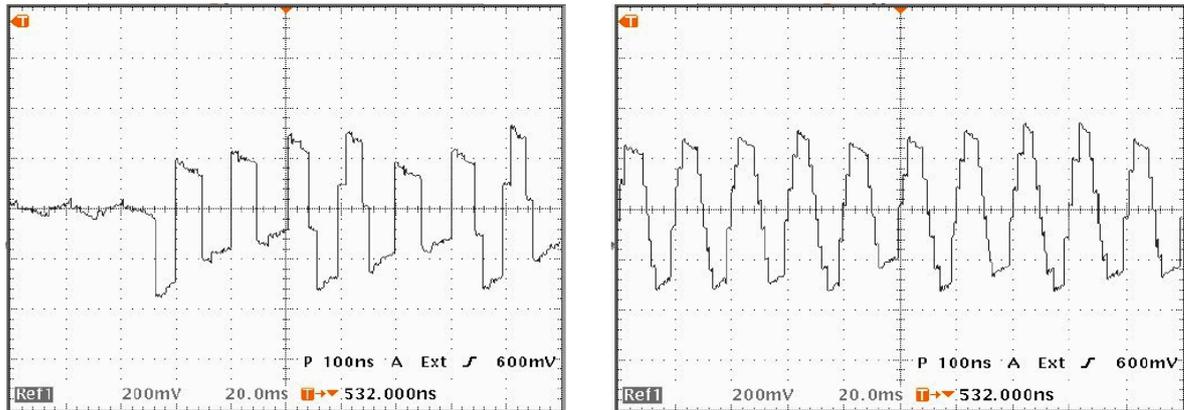


Рисунок 1.15 – Осциллограммы напряжения при включении разъединителя в начальный (слева) и близкий к окончанию (справа) моменты времени

В лабораторных экспериментах измерялась частотная характеристика ТТ той же марки и модели, что была на подстанции. Использовался анализатор спектра с встроенным свип-генератором. Результат измерений был получен в виде частотной зависимости импеданса ТТ в диапазоне от 10 кГц до 5 МГц. В спектрах напряжения и тока основная резонансная частота составляла 1,127 МГц, а эквивалентное последовательное сопротивление 7,46 Ом.

В итоге была составлена эквивалентная схема ТТ в виде последовательного соединения ёмкости ( $C_s$ ), индуктивности ( $L_s$ ) и сопротивления ( $R_s$ ). Для их определения учитывалось, что ТТ находятся над уровнем земли на железобетонных стойках с индуктивностью ( $L_{base}$ ). Характеристики измерительной цепи также оценивались теоретически. В итоге методом проб и ошибок было установлено, что  $C_s = 1$  нФ,  $L_s = 4,4$  мкГн и  $R_s = 6,5$  Ом.

На рисунке 1.16 приведены расчётные амплитудно-частотные характеристики напряжения и тока для описанной эквивалентной схемы.

Расчёты тока, протекающего через ТТ на землю, были проведены с эталонным перепадом напряжения амплитудой 100 кВ. Результат одного такого моделирования приведён на рисунке 1.17.

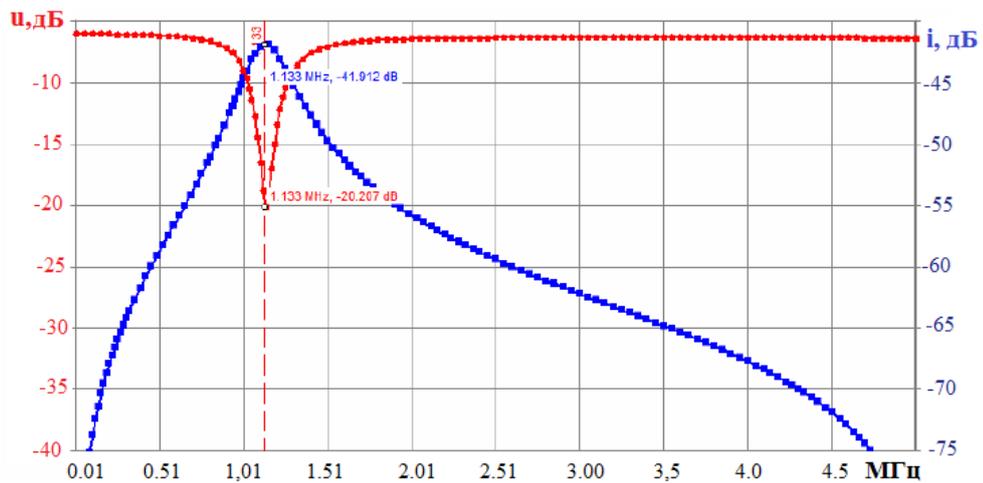


Рисунок 1.16 – Амплитудно-частотные характеристики напряжения и тока

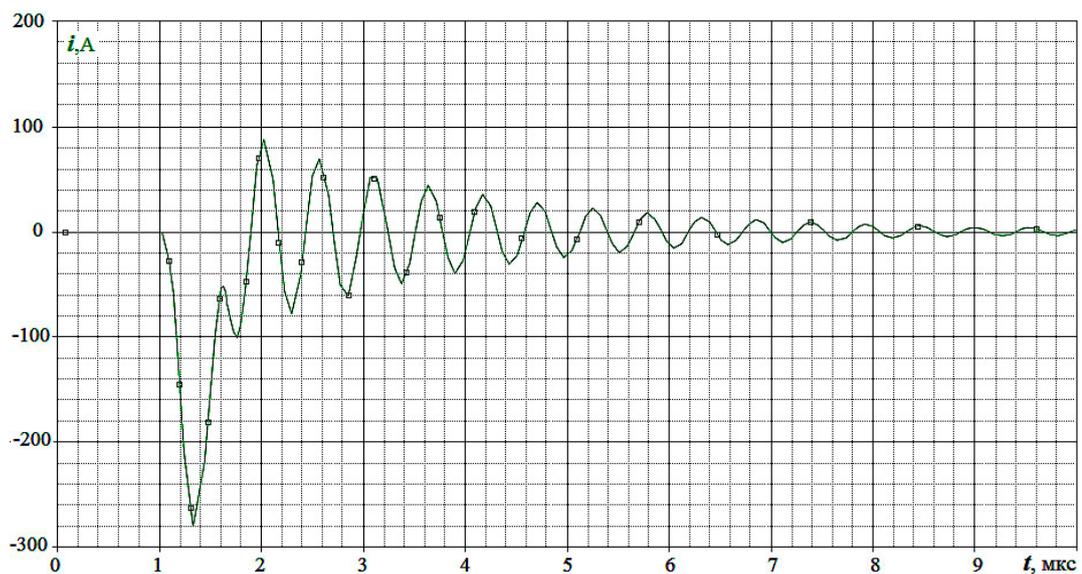


Рисунок 1.17 – Ток, стекающий через ёмкость изоляции трансформатора тока на землю при воздействии ступени напряжения 100 кВ

Как и ожидалось, в токе присутствовали затухающие колебания с частотой 1,9 МГц. Амплитуда тока снижалась до 10 % и менее от максимального значения после 6 мкс после начала переходного процесса. Пиковый ток достигал величины 280 А на каждые 100 кВ ступени напряжения. Используя коэффициент пересчёта 2,80 А / кВ, были определены максимальные и средние значения пиковых токов. Они составили 1206 А и 1060 А соответственно. Подчёркнём, что такие импульсные токи протекают через изоляцию реального ТТ при каждом искровом пробое межконтактного промежутка разъединителя.

*Резонансные процессы внутри электромагнитных аппаратов.* Сама возможность возникновения резонансов напряжения и тока внутри любого

аппарата, содержащего индуктивные и ёмкостные элементы, не требует особых доказательств. Вопрос состоит только в том, какого вида, на каких частотах и с какой добротностью эти резонансы могут возникнуть, а также в каких местах внутри устройства они могут привести к отрицательным последствиям.

Появление элегазовых и вакуумных выключателей привело к более высоким частотам коммутационных перенапряжений и, как следствие, к более частому возникновению резонансных процессов внутри обмоток силовых трансформаторов. Так, например, авторы [31 – 34] с помощью математических моделей показали существование внутренних перенапряжений с кратностью более 3 по отношению к напряжению на вводе блочного трансформатора на частоте порядка 2 МГц. При коммутациях разъединителей внутри КРУЭ генерируется ещё более широкий спектр частот, а квазикоаксиальная конструкция КРУЭ обеспечивает высокую добротность резонансных процессов.

Наибольшую опасность для изоляции, по определению, несут резонансы напряжения. Одним из устройств, в которых с наибольшей вероятностью внешние (по отношению к нему) перенапряжения высокой частоты возбуждают внутренний резонанс напряжения, являются вводы высокого напряжения типа «воздух – элегаз». Они и стали предметом особого внимания в [40 – 45].

В [40] расчётная модель испытательной установки и большой модели ввода были выполнены в среде Spice. Модель ввода была выполнена в двух различных версиях. В простой модели потери в изоляции были смоделированы резистором и конденсатором. Длина ввода моделировалась только линией передачи в каждую сторону от фланца. Тест-вывод (в том числе и вывод ПИН) моделировался только индуктивностью и сопротивлением. Расчёты на модели дали хорошее согласие с измерениями, но не могли показать, что происходит по длине ввода.

Вторая модель ввода в мельчайших деталях отражала осевую геометрию, как внутри, так и снаружи ввода. Она состояла из примерно 500 линий, которые имели параметрические свойства. Эта модель потерь лучше работала, так как элементы в схеме замещения имели частотную зависимость. В небольших вводах можно было включить каждую обкладку в модели, но для большого ввода из-за

программных и аппаратных ограничений в модель включались только каждая вторая или третья обкладка. Этого оказалось вполне достаточно, чтобы получить хорошее разрешение в распределении напряжения по длине ввода.

Аналогичные исследования были представлены в [44]. Одна из наиболее важных предпосылок заключается в том, что напряжённость электрического поля в теле ввода определяется резонансной частотой внешней цепи с подключённым к ней вводом, которая может взаимодействовать с внутренними резонансными частотами самого ввода. Особенно опасная ситуация может возникнуть, когда внешние резонансные частоты близки к частотам внутренних резонансов. Внешние резонансы определяются свойствами цепи, к которой ввод соединён с нею и вносит ёмкость основной изоляции. Внутренние резонансы создаются ёмкостями и индуктивностями внутри самого ввода.

Оценку частотных свойств провели на вводе с RIP-изоляцией с использованием генераторов синусоидального и прямоугольного импульсного напряжения (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 – Лабораторные измерения свойств ввода 220 кВ

Схема измерений вызывает уважение тремя деталями:

- грамотно выполнен ввод напряжения через кабель с согласующим сопротивлением, выполненным «веером» параллельных резисторов, замкнутых на пластины, соединённые с фланцем заземляющими проводниками;

- сопротивление измерительного шунта выбрано равным волновому сопротивлению измерительного кабеля;
- на оплётках обоих кабелей видны ферритовые кольца, предназначенные для защиты от помех и перенаводок.

В амплитудно-частотной характеристике (рисунок 1.19а) наблюдался резонанс токов на частоте 8 МГц. В переходной характеристике (рисунок 1.19б) можно отметить длительность фронта 45 нс при длительности фронта входного импульса 6 нс.

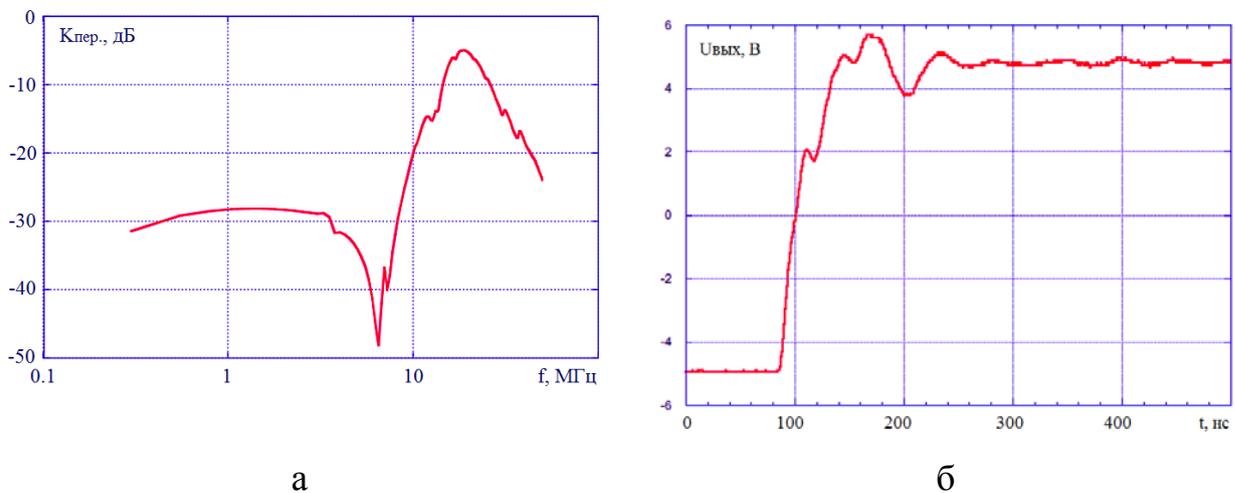


Рисунок 1.19 – Амплитудно-частотная (а) и переходная (б) характеристики ввода 220 кВ

Попытку провести измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) отечественных вводов предприняли авторы [45]. Эту попытку нельзя назвать удачной уже после первого взгляда на схему измерений (рисунок 1.20).

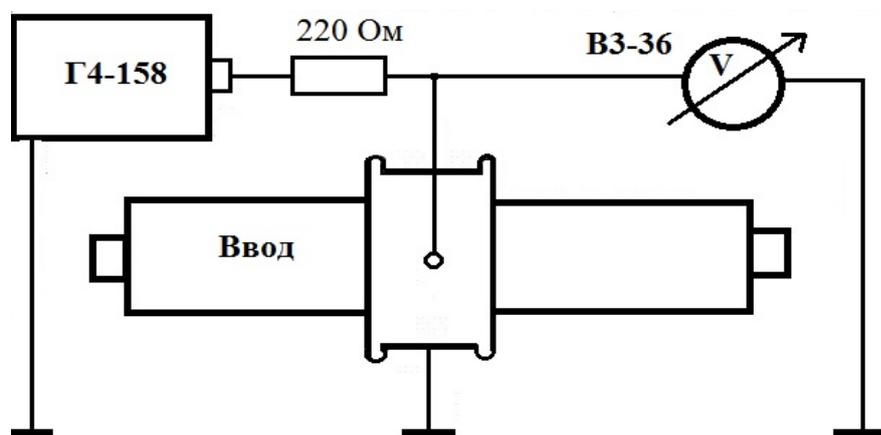


Рисунок 1.20 – Схема измерений амплитудно-частотных характеристик вводов

По такой схеме можно измерить только амплитудно-частотную характеристику последней обкладки ввода. Можно было бы предположить, что в изображении схемы допущена ошибка, но приведённые автором результаты измерений заставляют думать о принципиальном непонимании и неверной постановке задачи исследований. Приведённые характеристики явно относятся к последним обкладкам вводов на 220 кВ  $-L = 0,235$  мкГн,  $C = 890$  пФ; на 500 кВ  $-L = 0,284$  мкГн,  $C = 967$  пФ. Как видим, ёмкости близки к  $C3$ , а индуктивности близки к индуктивностям последних обкладок, если их величины оценивать исходя из длины и погонной индуктивности 1 мкГн/м.

Исходя из той же оценки, для вводов 220 кВ длиной около 4 м индуктивность должна быть порядка 4 мкГн, а для вводов 500 кВ длиной до 7 метров – 7 мкГн. Ёмкости основной изоляции у вводов обоих классов напряжения близки друг к другу  $C3 = (500 - 600)$  пФ. Значит, резонансные частоты следует ожидать порядка 3,5 МГц для вводов 220 кВ и 2,8 МГц для вводов 500 кВ.

Меры подавления ВЧ перенапряжений и защиты от них. В [38] мероприятия по ограничению ВЧ- перенапряжений и защите от них оборудования приведены в отдельном разделе для действующих и проектируемых подстанций. Кратко их можно изложить в следующем виде.

На действующих подстанциях 110 кВ и выше для ограничения ВЧ-перенапряжений рекомендовано, в первую очередь, использовать возможности принудительного и высокочастотного делений шин.

Для открытых распределительных устройств (ОРУ) с числом ячеек 10 и более или имеющих длинные (более 50 м) воздушные переходы к аппаратам рекомендовано выполнить анализ ожидаемых уровней ВЧ перенапряжений при коммутациях разъединителями холостых участков шин и провести регулировку приводов разъединителей на синхронность движения ножей. При использовании ручного привода операции включения и (особенно!) отключения разъединителей должны проводиться максимально быстро с исключением недовключённого положения разъединителя.

На подстанциях 220 кВ и выше целесообразно подачу напряжения на протяжённые холостые шины (например, обходные) и снятие напряжения с них осуществлять выключателями по аналогии с режимом опробования шин. На электрических станциях те же операции целесообразно выполнять выключателями, предварительно снизив напряжение генераторных блоков.

При обнаружении фактов срабатывания разрядников или ОПН во время коммутаций разъединителями необходимо провести общие мероприятия по ограничению ВЧ перенапряжений, а при необходимости изменить места установки аппаратов, например, поставить под защиту оборудования с большой входной ёмкостью. Нельзя располагать разрядник в средней части длинных (более 50 м) воздушных переходов от блочных трансформаторов и автотрансформаторов, вблизи разомкнутых концов рабочих и обходных систем шин или перед ВЧ-заградителями со стороны распределительного устройства.

Для исключения отказов самих ВЧ-заградителей в виде пробоев изоляции и разрушений элементов настройки необходимо выполнить работы по ограничению ВЧ перенапряжений, в том числе, устанавливая дополнительный реактор для ограничения ВЧ перенапряжений на основном заградителе.

Для проектируемых распределительных устройств 110 кВ и выше необходимо отдавать предпочтение следующим вариантам исполнения шин:

- основные системы шин должны иметь максимальную ёмкость на землю за счёт расположения в нижнем этаже ОРУ, уменьшения высоты подвеса, увеличения сечения проводов, увеличения шага расщепления, установки оборудования с повышенной ёмкостью;
- обходные системы шин должны иметь минимальную ёмкость на землю за счёт мероприятий, противоположных перечисленным выше;
- короткие участки шин, подлежащие коммутации шинными разъединителями и разъединителями обходной системы шин (шины ячеек выключателей, шинных разрядников, ОПН, шинных ТН и т.д.), при коммутации которых выполняется условие  $C_{\Pi} \gg C_x$ , должны иметь максимальную ёмкость на землю.

На протяжённых системах шин, подлежащих частым эксплуатационным коммутациям разъединителями в холостом режиме (обходные системы шин), использование ёмкостных ТН типа НДЕ нежелательно. Предпочтение следует отдавать электромагнитным ТН, которые целесообразно устанавливать на всех трёх фазах шин.

На рабочих системах шинах ОРУ и на длинных (более 50 м) воздушных переходах к блочным трансформаторам или силовым автотрансформаторам целесообразно использовать ёмкостные ТН. Эффективным средством ограничения ВЧ перенапряжений является установка на питающих шинах, на длинных воздушных переходах к силовым трансформаторам специальных ёмкостей в виде конденсаторов связи. Предпочтительное место их установки, а также ёмкостных ТН – средняя часть шин.

Для ОРУ с протяжёнными 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 упрощённой защитой. Особо эффективно высокочастотное деление на обходных системах шин. Практическое применение высокочастотного деления должно быть скоординировано с задачей обеспечения грозозащиты оборудования. Если высокочастотное деление шин затруднено, то необходимо обеспечить рассогласование собственных частот шин в (1,5 – 2) раза.

По-видимому, большей эффективности подавления ВЧ перенапряжений можно ожидать с использованием вместо ВЧ-заградителей специальных частото-зависимых устройств [47, 48]. В них с ростом частоты напряжения, кроме пропорционального роста индуктивной составляющей сопротивления, растут и активные потери.

В КРУЭ авторы [49] экспериментально опробовали два способа подавления колебаний и сделали следующие выводы:

– применение ферритовых колец, охватывающих токопровод, непрактично из-за насыщения ферритов ВЧ-токами и очень малого эффекта подавления;

– радиочастотный резонатор внутри КРУЭ способен снизить ВЧ-перенапряжения, но первый пик не ослабляется;

– резонансная частота резонатора должна попадать в диапазон доминирующей гармоники в спектре ВЧ-перенапряжений. Кроме того, резонатор должен быть на что-то нагружен.

На рисунке 1.21 видно лёгкое подавление ВЧ-перенапряжений в КРУЭ с резонатором, нагруженным на резистор (серый цвет), и без него (чёрная кривая).

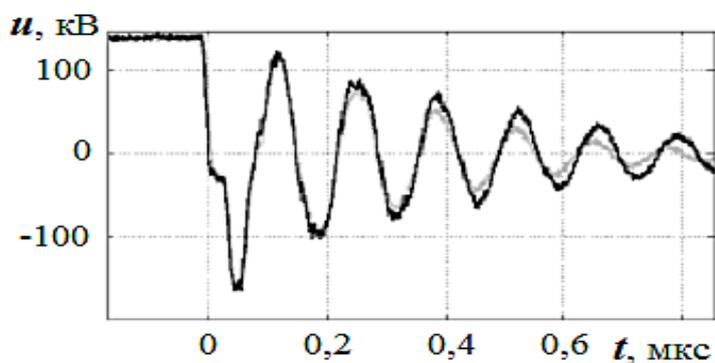


Рисунок 1.21 – Эффект подавления коммутационного перенапряжения высокой частоты с помощью резонатора

#### 1.4 Диагностирование и мониторинг оборудования с изоляцией конденсаторного типа

В п. 1.2 уже обсуждались возможные причины повреждения измерительных трансформаторов тока в целом и типа ИМВ 550, в частности. Слабым местом ТТ этого типа является изоляция первичной обмотки. Во-первых, изоляция может иметь дефекты из-за некачественного изготовления. Кроме ранее установленных дефектов сильфонной системы [17 – 20], наиболее вероятным дефектом представляется увлажнение бумажной изоляции остаточной влагой, адсорбированной на поверхности частиц кварцевого песка, который в смеси с маслом заполняет пространство между первичной обмоткой и фарфоровой

рубашкой. Тот же песок может являться «транспортёром» адсорбированных на его частицах молекул газа.

Во-вторых, в процессе эксплуатации при коммутациях изоляция ТТ подвергается воздействию высокочастотных, в том числе, как показано впервые в данной работе – внутренних резонансных перенапряжений (см. § 1.3). Воздействия перенапряжений могут иметь следствием резкие увеличения интенсивности частичных разрядов (ЧР) с выделением газов, образованию продуктов разложения масла и бумаги, кислот и воды.

По указанным причинам наибольшей эффективности следует ожидать от методов профилактических испытаний и диагностирования основной изоляции, которые направлены на выявление увлажнения, повышенных диэлектрических потерь [50 – 54] и интенсивности ЧР [55 – 63].

В данном параграфе мы сосредоточимся на изоляции конденсаторного типа, с выравнивающими (уравнительными) обкладками. Этот вид изоляции широко применяется во вводах и трансформаторах тока высокого напряжения, хотя её надёжность оставляет желать лучшего. Примерно каждая третья авария силовых трансформаторов и реакторов имеет причиной отказ изоляции ввода. Взрывы трансформаторов тока имеют следствием повреждения соседнего оборудования и пожары. По этой причине диагностированию оборудования с конденсаторной изоляцией уделяется большое внимание. При этом, несмотря на ряд успешных случаев своевременного выявления дефектов, например, методом регистрации ЧР, более откровенные и содержательные работы последнего времени показывают, что проблема эффективной диагностики ещё очень далека от своего разрешения.

Авторы [64, 65], привели обескураживающие сведения о ряде аварий оборудования, результаты диагностических действий с которым не давали никаких оснований для беспокойств. Предпринятые ими детальные исследования процессов флуктуации ЧР в модельных образцах бумажно-масляной изоляции лишь усугубили «идеологический разброд», наглядно продемонстрировав недостаточность наших представлений о комплексном (физическом и химическом) механизме ЧР в этом виде изоляции. Недаром, в огромном

количестве публикаций по тематике ЧР вообще, работ по бумажно-масляной изоляции выходит не более 10 в год в мире.

«Коварство» изоляции конденсаторного типа замечено с давних пор [66]. Согласно накопленной в России и ближнем зарубежье статистике [67] отказы ТТ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа, например, ТФРМ - 500 кВ происходят в основном в приработочный период (64 %) под влиянием конструктивных особенностей узла герметизации и условий эксплуатации (большое количество коммутаций и т.д.) и обусловлены развитием ионизационных процессов. Вероятные причины повреждений: нарушение герметичности или образование пониженного давления в баке при резком понижении температуры в зимнее время. В ряде случаев причинами были: длительное (до 6 лет) хранение ТТ в горизонтальном положении, а также нарушение технологии транспортировки, приводящие к ухудшению состояния изоляции (потеря пропитки во время хранения, попадание воздуха, разгерметизация, течи и низкий уровень масла).

Механизм развития повреждений ТТ рывовидной конструкции – электрический (ионизационный) пробой (отказы в холодное время года в приработочный период), а также смешанный: электрический с тепловым (отказы в жаркое время года у ТТ с большой наработкой).

Факторы влияния, общие для ТФРМ всех классов напряжения: недостатки технологии производства (54 % отказов ТФРМ-500 – до 1 года эксплуатации), конструкция узла герметизации, длительность хранения, в том числе в транспортном состоянии более 3 лет, схемно-режимные особенности ПС, особенности масла ГК, резкие перепады и понижения температуры.

Опыт эксплуатации маслonaполненных трансформаторов тока (ТТ) показывает, что нормируемый РД 34.45-51.300-97 [50] объём испытаний на отключённом от сети ТТ не позволяет своевременно обнаружить ни дефекты, приводящие к повреждениям, ни признаки преждевременного старения изоляции ТТ, связанного, например, с какими-либо внешними воздействиями.

В концепции трёхуровневой системы контроля состояния ТТ [68] лежит разделение на три уровня.

Контроль без отключения от сети предполагает периодический тепловизионный контроль, сканирование электромагнитного излучения ЧР и автоматизированный мониторинг тока небаланса и, по возможности, – интенсивности ЧР.

Контроль с отключением от сети включает физико-химический анализ масла; измерения диэлектрических характеристик основной изоляции ( $R$ ,  $C$ ,  $tg\delta$ ) при напряжении 10 кВ, а при необходимости, измерения при напряжении, близком к рабочему (от постороннего источника).

Длительные стендовые испытания при рабочем напряжении и токе, в том числе перед включением после длительного хранения.

Рассмотрим подробнее диагностическую эффективность контролируемых характеристик и симптомы развития повреждений, в том числе, на примерах обследований ТТ типа IMB 550, проведённых сотрудниками Новосибирской СПБ «Электросетьсервис».

*Контроль первого уровня (on-line).*

*Тепловизионный контроль* требует тщательности проведения и знания конструкций. Повышение температуры ТТ, вызванное ростом  $tg\delta$ , может быть выявлено при тепловизионном контроле по разности температур фарфоровых покрышек соседних (аналогичных) фаз одного присоединения. Температурный отклик разных конструкций различен из-за различий в излучательной способности поверхности и постоянной нагрева. Признаком опасного дефекта является различие температур более 0,3 [50] или 1°C [69].

На рисунке 1.22 приведён пример обнаружения предаварийного состояния одной из фаз группы трансформаторов тока с диспетчерским номером ТТ 1В-2РШ на ПС «Итатская – 1150 кВ».

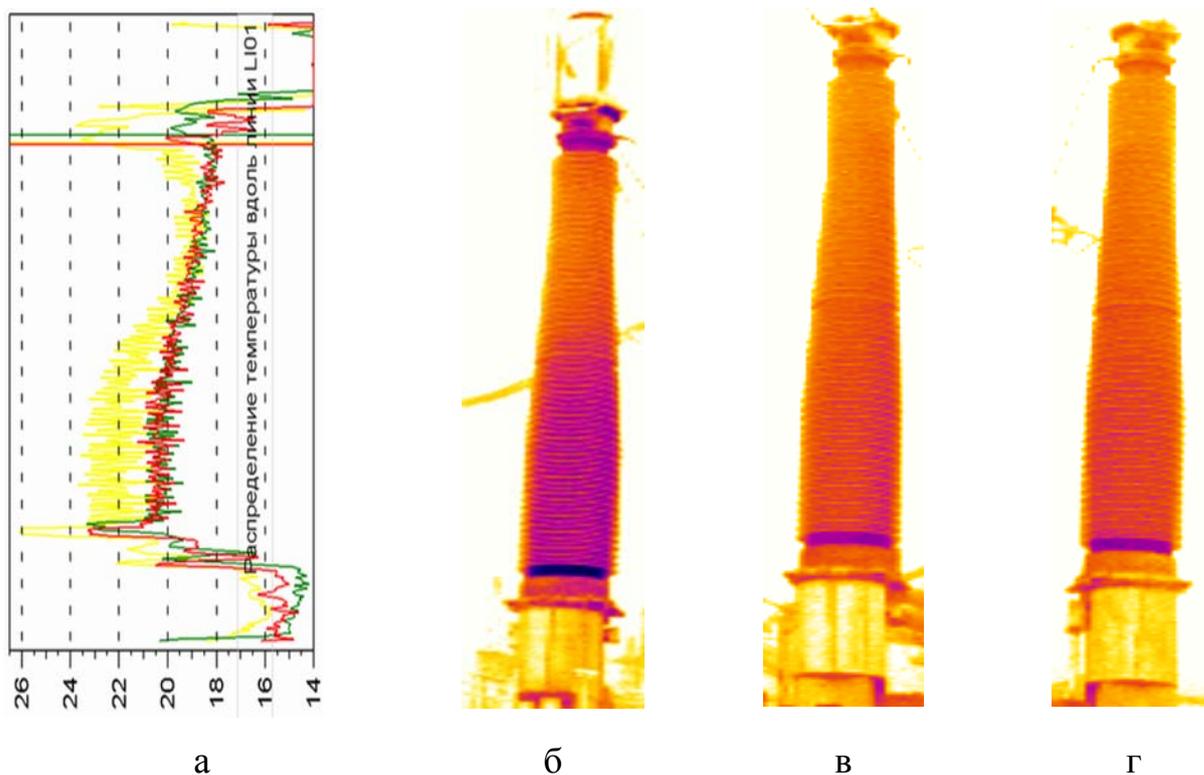
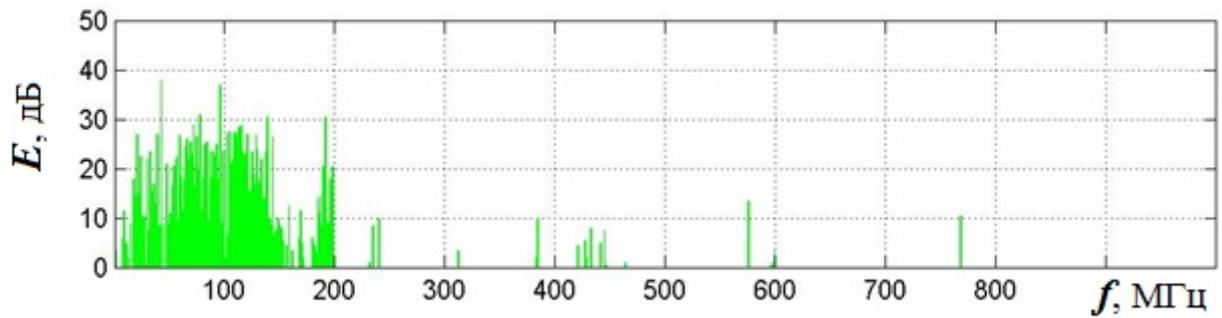


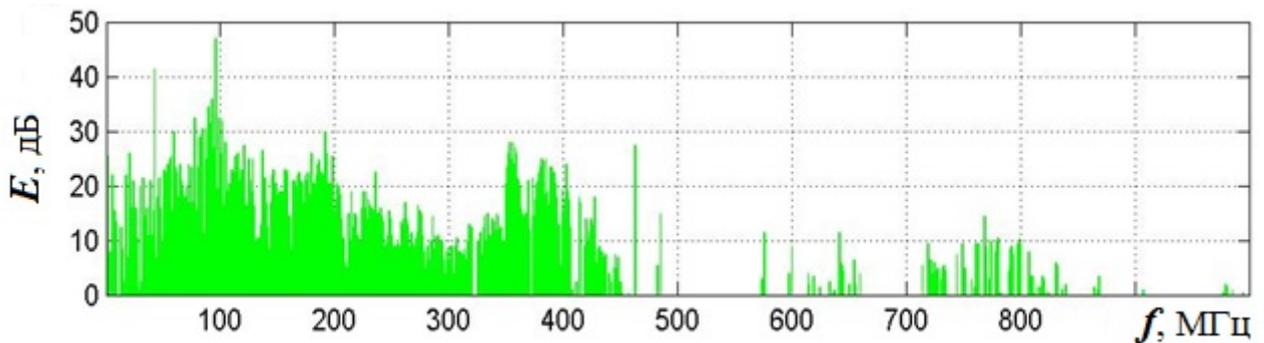
Рисунок 1.22 – Распределение температуры вдоль оси (а) и термограммы трансформаторов тока фаз А, В и С (б, в, г)

По сравнению с другими фазами на фарфоровой крышке ТТ ф. «А» наблюдалось превышение температуры на  $2,7^{\circ}\text{C}$ , т.е. почти на порядок превышало допустимое по [50] значение. Избыточный нагрев был связан с диэлектрическими потерями и аномально высокой интенсивностью ЧР.

*Контроль электромагнитного излучения разрядных процессов.* Регистрация распределения уровня электромагнитного излучения в диапазоне сверх- и ультравысоких частот также заслуживает внимания как один из дистанционных методов диагностирования состояния изоляции рассматриваемых трансформаторов тока. Основным источником излучения из них являются внутренние ЧР [63, 70, 71]. На рисунке 1.23 приведены результаты сканирования электромагнитного излучения двух фаз трансформаторов тока ИМВ 550 с нормальным и предаварийным состоянием изоляции. Измерения были выполнены специалистами Новосибирской СПБ «Электросетьсервис» на ПС «Итатская 1150 кВ» с помощью анализатора электромагнитного поля АКС – 1201 с направленной антенной.



а



б

Рисунок 1.23 – Частотные спектры электромагнитного излучения трансформаторов тока с нормальным (а) и дефектным (б) состоянием изоляции

Видно, что в области частот до 150 МГц интенсивности излучения близки друг к другу, что, по сути, является фоном помех от короны на присоединённых шинах, арматуре и верхних головных частей ТТ. Излучение в области частот выше 300 МГц было связано с ЧР, что подтвердилось регистрацией акустических и электрических сигналов.

*Мониторинг диэлектрических потерь.* Рост  $\operatorname{tg}\delta$  при рабочих значениях напряжения и температуры является признаком старения изоляции. В 2004 г. Новосибирской СПБ была смонтирована система мониторинга R-1500 на группе ТТ типа ТФРМ-500БУ1, находящихся в эксплуатации на ПС «Итатская-1150» под диспетчерским № ТТ В-521. Контроль за состоянием группы осуществлялся в ручном режиме: визуально во время обходов дежурными (с записью данных с дисплея прибора в особый журнал). Кроме того, специалисты «Электросетьсервиса» периодически «скачивали» данные мониторинга из памяти процессорного блока системы для последующей обработки и анализа.

Система простояла около года (с октября 2004 г. по август 2005 г.), после чего была демонтирована вместе с фазами группы. Отклонений в состоянии изоляции фаз ТТ в данный период отмечено не было. Основные характеристики изоляции в течение контроля с помощью системы R-1500 (производитель – фирма «ДИМРУС», г. Пермь) приведены на рисунках 1.24 – 1.26.

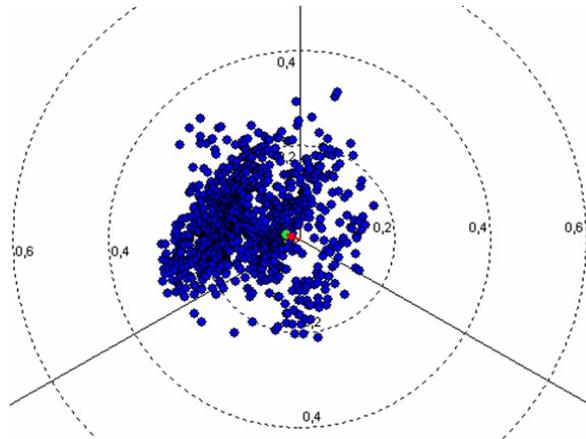


Рисунок 1.24 – Фазовая диаграмма вектора небаланса фаз ТТ

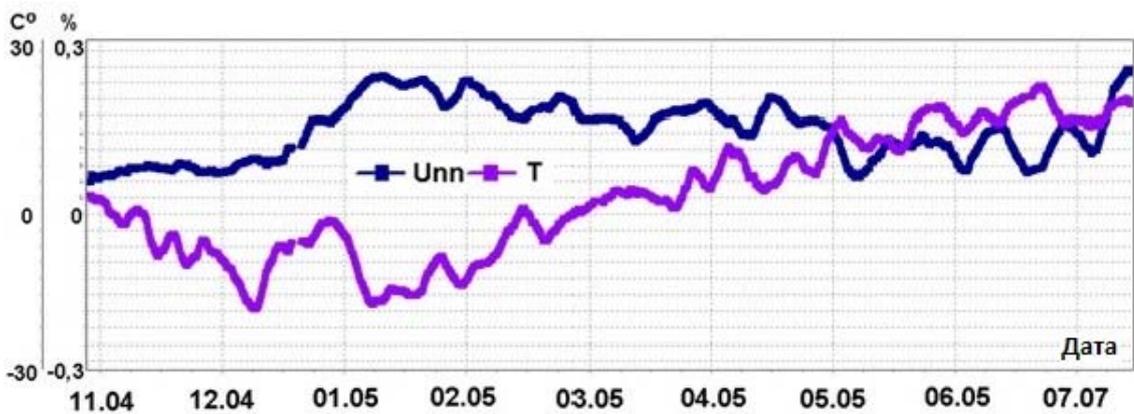


Рисунок 1.25 – Изменение тока небаланса (Unn) и температуры (Т) воздуха

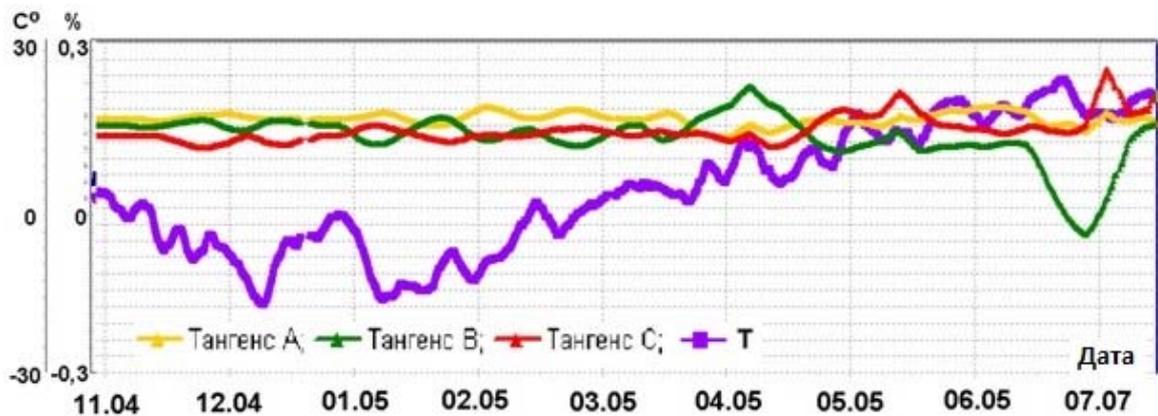


Рисунок 1.26 – Изменение тангенсов угла потерь фаз ТТ и температуры окружающего воздуха

Приведённые данные говорят об удовлетворительном состоянии изоляции фаз ТТ за отмеченный период: аномалий, выхода за предельные значения или каких-либо резких изменений в характеристиках изоляции отмечено не было.

Пример своевременного обнаружения дефекта по скачку тока проводимости приведён на рисунке 1.27 [72].

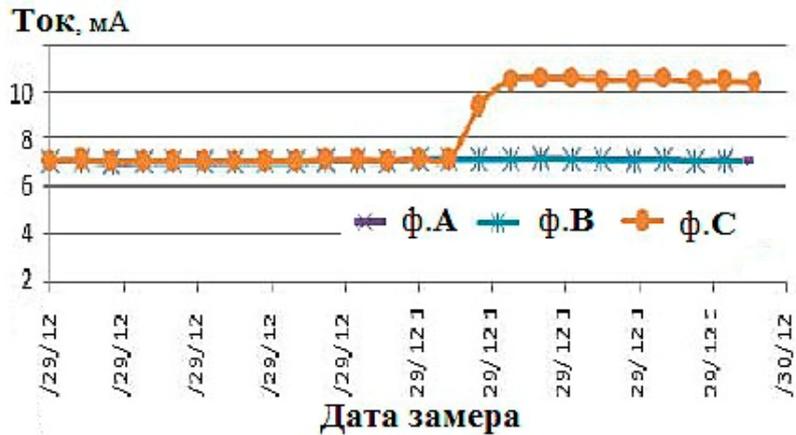


Рисунок 1.27 – Изменение токов проводимости изоляции вводов во времени

Регистрация интенсивности ЧР из-за нестабильности процесса эффективна только при непрерывном контроле (или при периодическом контроле с длительными отрезками времени непрерывного контроля – например, в течение суток подряд). Пример изменения разрядной активности приведён на рисунке 1.28 [72] в виде амплитудно-фазовых диаграмм импульсных сигналов.

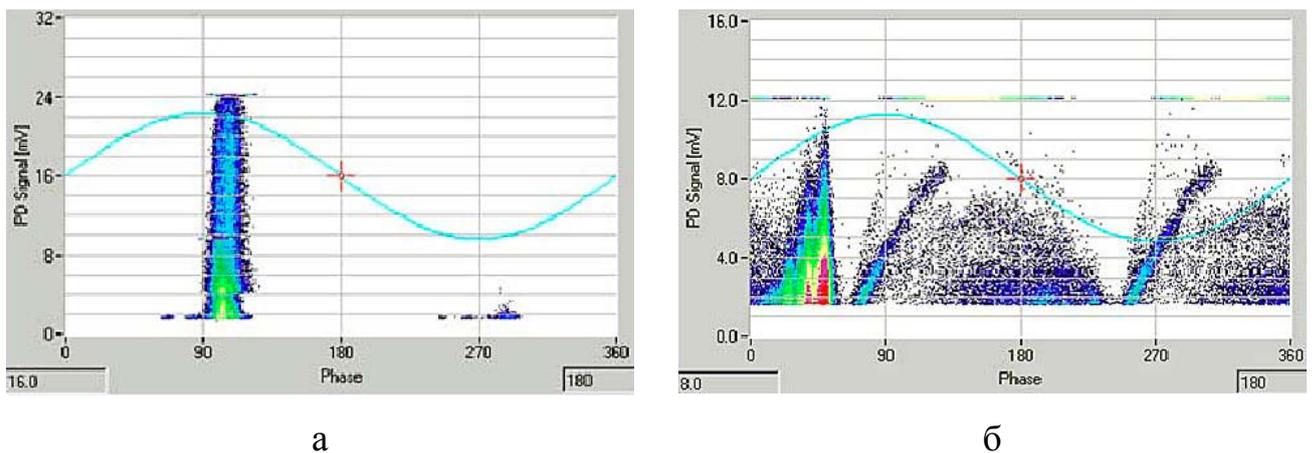


Рисунок 1.28 – Амплитудно-фазовые диаграммы сигналов ЧР в исходном (а) и при появлении дефекта (б)

Видно, что в исходном состоянии (рисунок 1.28а), регистрировались только сигналы короны при 90 (вспышки стримерной короны при положительной

полярности) и 270 электрических градусов (Тричелева корона при отрицательной полярности). При появлении дефекта (рисунок 1.28б), появились сигналы ЧР разной амплитуды, частоты повторения и в разных фазовых интервалах.

Вопросы мониторинга состояния изоляции ТТ рассматривались в [73], но наиболее впечатляющие результаты были достигнуты в [74]. До разработки системы мониторинга компания «New York State Electric & Gas Corporation» провела лабораторные исследования и стендовые испытания различных подсистем. В итоге был сделан вывод о том, что наибольшей информативной ценностью обладают результаты совместного измерения акустических и электрических сигналов ЧР, тока утечки и концентраций растворённых в масле газов. Именно из этих подсистем были собраны в опытную систему мониторинга, которая была опробована на подстанциях 345 и 765 кВ, причём в контролируемые группы ТТ были специально установлены трансформаторы, забракованные по результатам профилактических испытаний в эксплуатации, и апробация системы мониторинга длилась до полного пробоя изоляции в этих аппаратах. В ТТ 345 кВ рост интенсивности ЧР до 100 нКл отмечался обоими каналами за 18 часов до аварии, а скачок тока проводимости, соответствующий пробоем одного из слоёв изоляции, был зафиксирован за несколько минут до аварии. Авторы разработки отмечали, что акустические сигналы были достаточно мощными, хотя датчики крепились к дну аппарата, т.е. были на расстоянии 5 метров от источника мощных ЧР. В классе напряжения 765 кВ перед пробоем изоляции ТТ имело место быстрое нарастание концентраций растворённых в масле газов. После длительной проверки устойчивости системы мониторинга к внешним помехам (усиление короны и поверхностных разрядов во время дождя и т.д.) системы были установлены на действующих подстанциях указанных классов напряжения и проработали без сбоев в течение двух лет.

Наверное, обзор публикаций, посвящённых диагностированию изоляции ТТ по характеристикам ЧР был бы неполным без рассмотрения проблемы регистрации электрических сигналов ЧР в изоляции конденсаторного типа. Дело в том, что в зависимости от места расположения очага ЧР можно получить самые

различные оценки интенсивности ЧР из-за экранирующего эффекта выравнивающих обкладок. На это обратили внимание в своих публикациях [75 – 78] специалисты НСПБ «Электросетьсервиса».

*Контроль 2-го уровня (off-line).*

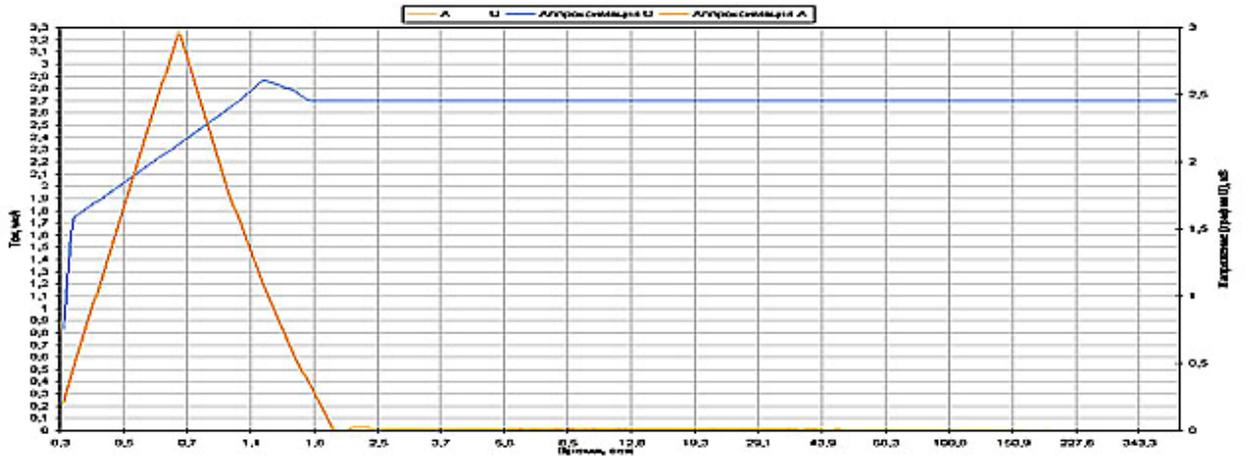
Сопротивление основной изоляции, из-за большого разброса значений, связанного с невысоким уровнем измерительной техники и качеством проведения испытаний, могут выявить только сильное ухудшение состояния изоляции. В большинстве современных электронных мегомметров проводится автоматическая фиксация сопротивлений изоляции в различные моменты времени с последующей обработкой данных и выдачей некоторых показателей процессов поляризации, например, коэффициента абсорбции  $R_{60}/R_{15}$  и др.

Изменение во времени токов абсорбции при фиксированном напряжении постоянного тока относится к методам определения неоднородности изоляции, связанной, как правило, с увлажнением и миграционной поляризацией. На рынке диагностической аппаратуры имеется много видов, предназначенных для измерений одного или нескольких параметров процесса: токов поляризации и деполяризации, возвратного напряжения, коэффициентов абсорбции и т.д. На рисунке 1.29 приведены кривые изменения токов поляризации, полученные с помощью цифрового измерителя токов абсорбции ЦИТА-2 на двух трансформаторах тока типа ИМВ 550 с нормальной ( $tg\delta = 0.25\%$ ) и увлажнённой ( $tg\delta = 1,3\%$ ) изоляцией первичной обмотки.

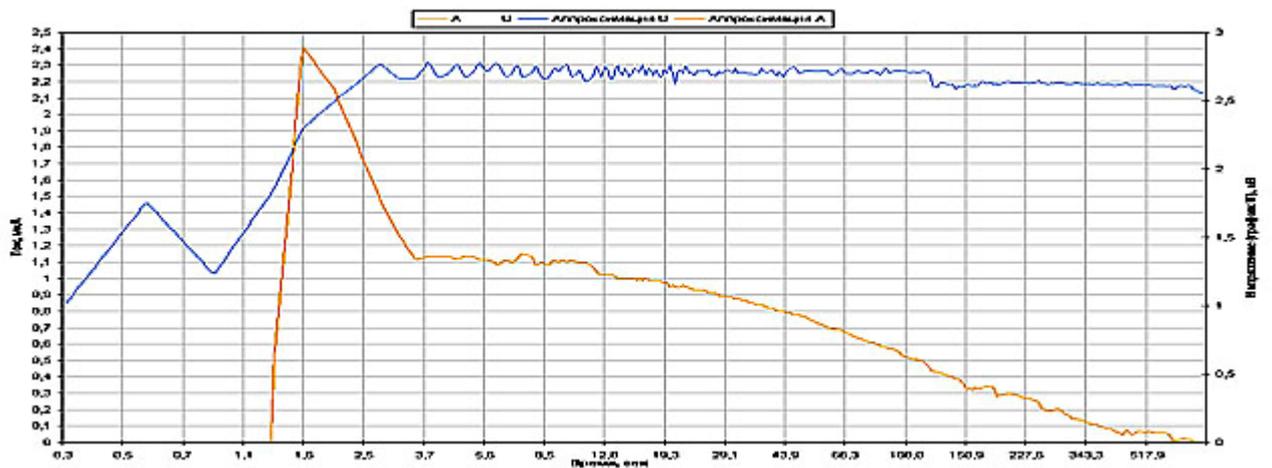
*Диэлектрические потери.* Величина  $tg\delta$ , измеренная при напряжении 10 кВ, хотя и не позволяет обнаружить дефекты на ранней стадии развития, однако в отсутствие контроля под рабочим напряжением остаётся существенной характеристикой для ТТ с конденсаторной изоляцией.

*Зависимость  $tg\delta$  от напряжения и температуры.* Рост  $tg\delta$  с повышением напряжения происходит из-за появления ионизационных потерь (прирост  $tg\delta$  свыше 0,1% при изменении напряжения с 10 кВ до  $U_{н.р.}$  может быть вызван ЧР с кажущимся зарядом порядка 1000 пКл), роста проводимости остова и поверхностной проводимости остова. Для новых ТТ допускаются значения  $tg\delta =$

0,3 %, а при изменении напряжения с 35 кВ до  $U_{н.р.}$  допускается увеличение  $\Delta tg\delta$  (U) = 0,01 – 0,015 %, но не более, чем на 0,03 %.



а



б

Рисунок 1.29 – Изменение тока поляризации в сухой (а) и увлажнённой (б) изоляции трансформаторов тока

*Зависимость  $tg\delta$  от температуры.* В новых ТТ с изоляцией конденсаторного типа такие зависимости практически отсутствуют, так что их появление свидетельствует о развивающихся дефектах. Старение изоляции вызывает экспоненциальный рост  $tg\delta$  и с повышением температуры:  $tg\delta = tg\delta_0 e^{\alpha(T - T_0)}$ , где  $\alpha$  – показатель степени старения изоляции представляется одной из наиболее эффективных диагностических характеристик.

Допустимые значения  $\alpha$  лежат в области  $\alpha = 0,01 - 0,015$ . Значения  $\alpha = 0,015 - 0,03$  характеризуют подозрительное или дефектное состояние, а  $\alpha > 0,03$  – сигнал опасного состояния.

*Интенсивность ЧР.* Рост интенсивности ЧР при изменении напряжения от 10 кВ до  $U_{н.р.}$  является симптомом дефектного состояния изоляции.

*Масло.* Измерения характеристик масла необходимо использовать при оценке состояния изоляции ТТ всех конструкций. Ниже мы остановимся подробнее на характеристиках масла и продуктов его старения, а здесь рассмотрим характеристики, которые предписываются для обязательной проверки.

*Пробивное напряжение ( $U_{пр}$ ) и  $tg\delta_m$  при 90 °С.* Понижение  $U_{пр}$  и повышение  $tg\delta_m$  дают информацию о полярных загрязнениях и продуктах разложения (вода, проводящие частицы), которые накапливаются в процессе старения. Количество продуктов загрязнения и разложения возрастает при повреждении системы герметизации. Снижение  $tg\delta_m$ , измеренного на спаде температуры, по сравнению с измеренным при нагреве (измерения при температурах 20 – 70 – 90 – 70 – 20 °С), свидетельствует о накоплении в масле коллоидных продуктов.

*Влагосодержание масла ( $W$ ).* Повышение влагосодержания может быть вызвано нарушением герметичности аппарата, а в негерметичном аппарате – сильным старением бумажной изоляции.

*Кислотное число ( $Kч$ )* – даёт мало информации, и поэтому его можно контролировать реже.

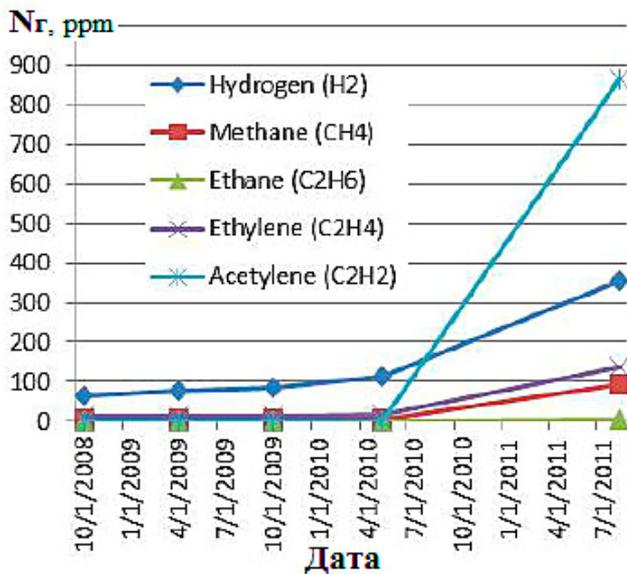
*Температура вспышки масла ( $T_{всп.}$ )* даёт мало информации для диагностирования изоляции и становится бессмысленной при использовании АРГ.

*АРГ.* Образование в масле газов разложения, в особенности водорода и метана ( $H_2$  и  $CH_4$ ) можно отнести к первичным признакам развития электрического повреждения (ЧР), а ацетилен ( $C_2H_2$ ) появляется только при мощных ЧР. В новых ТТ эти газы практически отсутствуют. Содержание и соотношение  $CO$  и  $CO_2$  в масле могут быть дополнительным средством диагностики в случае развития в изоляции термического повреждения.

Определение общего газосодержания масла  $\Sigma(O_2 + N_2)$  является способом контроля герметичности ТТ типа ТФРМ и ТФУМ и возможного перенасыщения масла воздухом. Поэтому при хроматографическом анализе газов в масле, кроме газов разложения, необходимо определять также содержание газов воздуха  $O_2$  и  $N_2$ . Обследование ТТ на предприятиях МЭС Северо-Запада, Центра, Сибири и др. общим числом около 100 единиц ТФРМ330 – 750 кВ с наработкой 10 – 20 лет показало, что у большинства нормально работающих ТТ  $\Sigma(O_2 + N_2) = 8 – 11\%$ . Это может быть следствием потери герметичности ТТ со временем, но может быть вызвано попаданием воздуха в пробу при хроматографии. Поэтому на сегодня нельзя производить отбраковку по нормативу РД [79]  $\geq 4\%$ .

Пример, подтверждающий эффективность ХАРГ для дефектоскопии, приведён на рисунках 1.30а и 1.30б, заимствованных в [72].

*Хроматографический анализ трансформаторного масла.* Данный метод можно также реализовать в режиме «on-line». Пробы масла в небольших количествах берут из работающего ТТ, используя для этого специальные устройства отбора проб через соответствующее отверстие.



а



б

Рисунок 1.30 – Изменение концентраций газов, растворенных в масле (а) и вызвавшее его повреждение изоляции на краю выравнивающей обкладки (б)

В качестве примера в таблице 1.5 приведены концентрации газов, растворённых в масле того же ТТ 1В-2РШ, фаза А, который был отбракован при тепловизионном обследовании.

Таблица 1.5 – Результаты хроматографического анализа газов в трансформаторе тока, находившемся в предаварийном состоянии

Какие	Концентрации газов, % объёмных						
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
Измеренные	7,598	1,509	0,0715	0,0000	0,0013	0,0018	3,583
Предельные	0,018	0,001	0,001	0,0020	0,0002	0,8000	2,3000

В результатах анализа наблюдались превышения измеренных относительно граничных концентраций газов (граничные значения были взяты для масла марки ГК): по метану и водороду – более, чем в 750 (!) раз; по ацетилену и этану – в 27 (!) и в 140 (!) раз, соответственно.

### 1.5 Анализ сведений о трансформаторном масле и методах его исследования

Трансформаторные масла (ТМ) являются смесями преимущественно насыщенных углеводородов с температурой кипения в интервале 300-400 оС, вырабатываемыми из нефтей с последующей ректификацией и дополнительной очисткой от примесей, содержащих серу, азот, кислород и металлы. Углеводороды, входящие в состав ТМ, представлены тремя группами молекул, структурно различаемыми по типу строения углеродного скелета и «качеству» связывания углеродных атомов [80, 81]:

- парафины, характеризующиеся цепным сочленением СН<sub>2</sub>-групп с линейными ответвлениями от основной цепи;
- нафтены (или циклопарафины), характеризующиеся 5-ти или 6-ти углеродной кольцевой структурой молекул с линейными ответвлениями и 2-х, 3-х и 4-х кольцевыми структурами, аннелированными с 6-ти членными циклами, с линейными ответвлениями (продукты гидрирования алкилпроизводных нафталина, антрацена, фенантрена и других конденсированных углеводородов);

– ароматические углеводороды, характеризующиеся наличием в структуре молекул ненасыщенных (ароматических) 6-ти членных и аннелированных циклических фрагментов с линейными ответвлениями (алкилпроизводные бензола, нафталина, антрацена, фенантрена и т.п.).

Углеводородный состав ТМ и «средняя» молекулярная масса углеводородов, определяемая криоскопическим или эбулиоскопическим методами, находится в интервале (230 – 330) а.е.м. Она зависит от географического происхождения нефти, способа её переработки и последующей ректификации. Определение содержания индивидуальных углеводородов в ТМ затруднено преимущественно по причине многокомпонентности смесей, а также, в значительной степени, близости физико-химических свойств насыщенных углеводородов.

В исследовательских работах углеводороды ТМ анализируют по составу:

~ элементному, определяя брутто-соотношение углерода и водорода, а также наличие азота, серы и других элементов, минеральных (несгорающих) примесей;

~ групповому, определяя методами ИК, УФ, масс-спектропии содержание парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов в разделённых хроматографическими методами «узких» фракциях ТМ;

~ структурно-групповому, определяя содержание «ароматических», «нафтеновых», «парафиновых» компонентов на основании физических параметров ТМ, таких как плотность, коэффициент преломления, молекулярная масса, кинематическая вязкость.

По составу углеводородов ТМ неодинаковы; масла, используемые в Англии, Бельгии, Швейцарии и Швеции [81], характеризуются относительно низким относительным содержанием ароматических углеводородов,  $S_a \approx 3,1 \%$ , а типичное ТМ, используемое в США, содержит больше ароматических углеводородов:  $S_a \approx 7,5 \%$ . Отечественные ГОСТы не предусматривают регламентацию углеводородного состава ТМ. В российских трансформаторных маслах  $S_a$  варьирует в зависимости от марки масла от 1,6 % (масло ГК) до 10 % (масло Т1500).

Основные характеристики ТМ (физические и химические) в значительной мере определяются соотношением структурных типов атомов углерода в углеводородах. Так, например, парафины и циклопарафины в составе ТМ обеспечивают ему низкую электропроводность и высокую электрическую прочность. От соотношения концентраций парафинов и циклопарафинов зависит и температура застывания масел. В сравнении с парафиновыми нафтеновые и алкилзамещённые ароматические углеводороды более подвержены процессам окисления [82]. В качестве иллюстрации в таблице 1.6 приведены данные, характеризующие эксплуатационные характеристики ТМ в зависимости от распределения атомов углерода в углеводородах ТМ по структурным типам [83].

Из данных таблицы 1.6 следует, что склонность ТМ к газовыделению в процессе эксплуатации не зависит линейно от соотношения атомов углерода в нафтеновых циклах и парафиновых цепях. С увеличением доли «ароматических» атомов углерода до (8 – 10) % масла становятся газопоглощающими.

Таблица 1.6 – Основные характеристики молекулярного состава и свойства трансформаторных масел

Показатель	ТСп	T-1500	ГК	Nitro 11GX	Nitro 10X
Массовое содержание «типов» атомов углерода, %:					
в ароматических циклах	9,6	8,6	1,6	4,46	0,85
в нафтеновых циклах	-	-	40,2	56,04	61,25
в парафинах и алкильных цепях	-	-	58,2	39,50	37,90
Индукционный период окисления по методу МЭК, час	30-40	60-70	200-250	103-120	320
Газостойкость по методу МЭК:					
газовыделение, мкл/мин	-	-	26	10	25
газопоглощение, мкл/мин	-8.3	-8.0	-	-	-

Известно увеличение склонности ТМ и выделенных из них нафтено-парафиновых фракций к газовыделению при снижении вязкости, а также с уменьшением показателя преломления, который является характеристикой доли

ароматических углеводородов в маслах: ТМ с показателями преломления меньшими 1,475 преимущественно выделяют газы, а большими, чем 1,485 – газы поглощают [80]. Под воздействием электрических разрядов в ТМ выделяется, в основном, водород, и масло претерпевает необратимые превращения, проявляющиеся в увеличении средней молекулярной массы молекул, вязкости, йодного числа и диэлектрических потерь  $tg \delta$  [83].

Влага в ТМ оказывает влияние на диэлектрические характеристики [84 – 86]. Растворённая в ТМ вода увеличивает ионную проводимость, но даже в больших концентрациях не влечёт за собой существенного повышения  $tg\delta$ . Вода в эмульгированном состоянии вызывает электрофоретическую проводимость и заметный рост величины  $tg\delta$ . Вода, «связанная» присутствующими в ТМ примесями полярной природы, каковыми являются продукты старения масла, также заметно повышает диэлектрические потери. Таким образом, диэлектрические потери, обусловленные присутствием воды в масле, зависят не только от общего её содержания, но от агрегатного состояния. Попутно, следует отметить, что «связанная» вода практически не определяется рекомендованным в «Объёмах и нормах испытаний электрооборудования» гидрокальциевым методом (метод Фишера) по ГОСТ 7822 – 75, что отмечалось в [80].

Наличие растворённых в ТМ кислородсодержащих соединений, образующихся в процессе старения ТМ, не оказывает существенного влияния на диэлектрические потери ТМ. Однако при достижении концентрации упомянутых соединений выше предела их растворимости, на что указывает помутнение масла и выпадение из него осадка, диэлектрические потери резко возрастают [80, 87 – 89].

Наиболее ценное потребительское качество ТМ – способность сохранять параметры в допустимых интервалах при длительной эксплуатации. Процессы, приводящие к старению ТМ (потере потребительских свойств), с химической точки зрения можно разделить на два типа.

Первый – это химические процессы, приводящие к диспропорционированию молекулярных масс углеводородов ТМ с сохранением их насыщенности. Процесс

диспропорционирование масс инициируется, по-видимому, действием электрического разряда и заключается в последовательно

а) разрыве углеродной цепи углеводородов - образовании свободных водородного и алкильных радикалов, и, далее, в реакциях первично образующихся радикалов;

б) образовании молекулярного водорода и ненасыщенных углеводородов;

в) «сшивке» последних по механизму цепной полимеризации, либо димеризации алкильных радикалов.

По химическому результату – образованию высокомолекулярных и низкомолекулярных углеводородов относительно исходных – процесс идентичен побочным процессам, протекающим параллельно основному при термическом крекинге нефтей в отсутствие водорода. Высокомолекулярные углеводороды, будучи растворены в ТМ, способны влиять на его вязкость и температуру застывания, а также на диэлектрические характеристики. Более значительно их влияние на стабильность работы трансформаторов в случае сорбции на бумажную изоляцию. Низкомолекулярные углеводороды способствуют увеличению газовыделения при эксплуатации ТМ.

Второй тип – это химические реакции, приводящие к появлению кислородсодержащих функциональных групп в молекулах углеводородов, или, иными словами, к образованию низкомолекулярных (водорастворимых), жирных (водонерастворимых алициклических), нафтеновых и асфальтеновых кислот и кетонов, фенолов, спиртов, альдегидов и т.п. соединений, а также органических перекисей и гидроперекисей.

Механизмы образования кислородсодержащих функциональных групп при алифатических и ароматических атомах углерода перманентно исследуются ввиду их чрезвычайной практической значимости, в том числе, для процессов старения ТМ. С позиций рассматриваемой проблемы принципиальнейшим представляется вопрос об источниках атомов кислорода при образовании упомянутых соединений в условиях работы трансформаторов под нагрузкой. *Apriori* таковыми могут являться кислород воздуха и вода, десорбированная с бумажной изоляции и

растворенная в ТМ, и/или образующаяся при деструкции целлюлозы и иных соединений, составляющих основу бумажной изоляции [86, 90 – 92].

Вода химически инертна по отношению к насыщенным и ароматическим углеводородам в обычных условиях. Также ничтожна вероятность катализа этого взаимодействия солями карбоновых кислот, возникающими при окислении металлических частей трансформаторов. Несколько более вероятным представляется катализируемое этими солями взаимодействие воды и непредельных углеводородов – продуктов диспропорционирования насыщенных углеводородов ТМ. В таком случае, следует ожидать образования широкого спектра кислородсодержащих соединений, включающего соединения низшей степени окисления углерода (спирты, фенолы), промежуточной (альдегиды, кетоны) и высшей (карбоновые кислоты).

Однако фиксация в продуктах старения ТМ кислородсодержащих соединений, включающих в свой состав перекисные мостики (-O-O-), однозначно указывает на участие в реакциях какого-либо одного или нескольких чрезвычайно реакционно способных интермедиатов: анион-радикала молекулярного кислорода, дианиона пероксида, молекулярного озона, являющегося относительно стабильным радикалом. Все перечисленные интермедиаты происходят из молекулярного кислорода – первые два образуются при посадке на молекулярный кислород одного и двух электронов соответственно, последний – в результате диспропорционирования молекулярного кислорода. Причина образования этих частиц очевидна – электрические разряды различной природы в трансформаторах [80, 84]. В литературе описаны и механизмы образования гидроксильной, карбонильной и карбоксильных групп при гомолитическом разрыве кислород-кислородного перекисного мостика, что не исключает образования этого типа соединений из первично образующихся органических перекисей [80, 93].

Масло при подготовке к эксплуатации в обязательном порядке проходит вакуумную дегазацию и в процессе эксплуатации испытывает минимальный контакт с воздухом. По-видимому, неудалённые остатки растворённого в ТМ

молекулярного кислорода и воздух, проникающий во внутренний объём трансформатора при нарушениях герметичности, способны приводить к образованию упомянутых выше кислородсодержащих соединений.

Подтверждением приведённых рассуждений являются данные работы [90]. Снижение электрической прочности масла и маслобарьерной изоляции у трансформаторов может быть вызвано увлажнением твёрдой изоляции и масла как вследствие попадания атмосферной влаги в масло, так и вследствие образования воды в результате процессов старения самой изоляции, газовыделением из изоляции, коллоидным старением масла, граница между названными двумя состояниями влаги приходится на среднюю концентрацию влаги около 4% по массе, что соответствует завершению образованию мономолекулярного слоя на поверхности полимера целлюлозы. Негативное действие влаги связано и с образованием пузырьков газа и пара, выделяющихся из изоляции в масло от токов нагрузки в обмотках. Температура, при которой появляются пузырьки, зависит от содержания влаги в изоляции, причём у сухой изоляции она превышает 200 °С, а у влажной понижена до 100 °С.

Косвенным признаком увлажнения твёрдой изоляции может служить содержание влаги в ТМ, но оно зависит от динамики влагообмена в системе масло – твёрдая изоляция, и поэтому количественные показатели «самоувлажнения» изоляции трудно определить. Определимое с использованием стандартных методик содержание влаги (3 – 4) % в исходной бумаге при изготовлении изоляции, принимают за крайний предел. Известно, что проводятся разработки методов «бесконтактного» контроля состояния изоляции на основе анализа поляризационных процессов – измерения восстанавливающегося напряжения, токов заряда и разряда, параметров изоляции на переменном токе – ёмкости или тангенса угла диэлектрических потерь [86]. Имеются основания полагать, что и образующиеся относительно полярные перекисные соединения преимущественно будут адсорбироваться и концентрироваться на целлюлозной изоляции.

В качестве присадки, увеличивающей срок службы ТМ, к свежим маслам добавляют широко используемый ингибитор окисления полимеров - 2,6-дитрет.-

бутил-4-метилфенол (он же «ионол», «агидол») в концентрации до 0,3 – 0,5 % (большая концентрация приводит к ухудшению электрических показателей масла!). Предполагается, что агидол служит «перехватчиком» свободных радикалов в ТМ, ведущих процессы термической и окислительной полимеризации и деструкции углеводородов. С другой стороны, известно, что при хранении фенольных антиоксидантов на воздухе или при эксплуатации (хранении) при низких температурах органических материалов, стабилизированных стерически затруднёнными фенолами, происходит образование относительно устойчивых перекисных соединений хинолидной структуры [94]. Таким образом, процесс «антиокислительной работы» присадки тормозится на промежуточной стадии, и происходящие из неё хинолидные перекиси становятся потенциальными окислителями, способными инициировать полимеризацию углеводородов. В частности, показано, что в ингибируемых искусственно процессах окисления по мере образования устойчивых перекисей увеличивается скорость расходования антиоксиданта и снижается его антиокислительная способность по отношению к углеводородам. Установлено также, что перекиси хинолидной структуры как окислители более активны, нежели гидроперекиси. Эффекты, обусловленные таким механизмом окисления ТМ, способны, по-видимому, проявиться лишь в тех случаях, когда трансформаторы, заправленные ТМ, не эксплуатируются продолжительное время и хранятся при низких температурах. Не исключено, что при этом полярные молекулы агидола сорбируются целлюлозой, чем создаётся его повышенная локальная концентрация, приводящая к интенсификации процессов окисления как его собственного, так и ТМ.

Устойчивость ТМ к процессам старения зависит от его углеводородного состава: у парафиновых и нафтеновых углеводородов легче всего окисляется (и термоализуется) отрывом водородного радикала третичная СН-группа, т.е. та, которая находится в узлах разветвления насыщенной углеводородной цепи [80, 93, 95, 96]. Ещё более активна в этих процессах СН<sub>2</sub>- или СН-группы, непосредственно связанные с ароматическим кольцом («бензильное положение»).

Четвертичный углерод не способен вступать в реакцию сам и «препятствует» реакциям ближайших к нему  $\text{CH}_2$ -групп.

Наблюдаемые различия в течении процессов старения ТМ таковы:

~ парафиновые и нафтеновые углеводороды сохраняют исходную окраску как в отсутствие, так и в присутствии небольших количеств кислорода, при этом не выделяют водород в отсутствие кислорода и, наоборот, выделяют его в присутствии кислорода;

~ ароматические углеводороды темнеют и выделяют водород;

~ ионол (присадка-антиоксидант) окисляется медленнее, нежели бензильные положения ароматических углеводородов, что обуславливает низкую эффективность ионола в качестве антиокислительной присадки к ТМ, содержащим большое количество ароматических углеводородов [97].

*О природе и механизмах образования X-восков (X-wax).* Термин «X-воск» широко используется для обозначения воскоподобных продуктов, образующихся (осаждающихся) на различных внутренних поверхностях трансформаторов в процессе их эксплуатации, которые, как правило, обнаруживают после выхода трансформатора из строя. При этом следует отметить, что в литературе отсутствует единая точка зрения на причины образования X-воска. К ним относят низкие температуры, увлажнение бумажной изоляции, ЧР в трансформаторах и ионизированный водород [80, 84, 98]. Чаще всего X-воск фиксируют на поверхностях высоковольтных фарфоровых вводов и бумажной изоляции. Его присутствие существенно ухудшает изоляционные характеристики материалов.

Так, например, одной из основных причин вывода трансформаторов из эксплуатации является повреждение высоковольтных герметичных вводов из-за ухудшения состояния изоляции, сопровождающегося появлением налёта жёлто-бурого цвета поверхности нижней фарфоровой крышки внутренней поверхности вводов и следов частичных разрядов на жёлто-буром налёте и фарфоровой крышке. Отмечены сопутствующие этому явлению характерные особенности ТМ: увеличение  $\text{tg}\delta$ , присутствие взвешенного в ТМ осадка тёмного цвета. При исследовании состава этого налёта и ТМ из ввода установлено, что его

основу составляют мыла нафтеновых кислот, образующихся при окислении масла [82, 88]. В сравнительных испытаниях масел Т-750 и ГК показана бо́льшая интенсивность образования осадка в первом случае. В [85] отмечается, что с 1985 г в России для заполнения вводов используется масло ГК, поскольку применяемое ранее масло Т-750 приводило к характерным авариям, которым предшествовало отложение жёлто-бурого осадка на крышке и отмечалось увеличение  $tg\delta$  масла при низком значении кислотного числа.

В [92] воскообразному осадку, образующемуся в герметичных вводах при длительной эксплуатации трансформаторов, приписана роль адсорбера «металлосодержащих коллоидных частиц», в результате чего образуется токопроводящий осадок, снижается электрическая прочность канала, перераспределяется электрическое поле, что ведёт к развитию ионизационных процессов и пробоем изоляции.

Отмечено [80], что при длительной эксплуатации кабелей с пропитанной бумажной изоляцией ухудшается сопротивление изоляции, а в масле, пропитывающем изоляцию, появляются нерастворимые воскообразные продукты. Высказано предположение о том, что эти процессы связаны с возникновением в масле электрических разрядов.

В работах [90– 92] полагают, что наиболее сильное влияние на разрушение бумажной изоляции оказывают вещества, осаждающиеся на неё из окисленного масла. Такую «агрессивность» осадка объясняют действием содержащихся в его составе полимерных гидроперекисей [80].

Анализируя имеющиеся в литературе данные, можно предполагать, что химическая природа соединений, составляющих воскообразные осадки, различна для двух типов поверхностей, на которых они откладываются – фарфоровых крышек и бумажной изоляции. Основой жёлто-бурого осадка на фарфоровых крышках представляются мыла нафтеновых кислот, в то время как на бумажной изоляции осаждаются высокомолекулярные соединения. В работе [98] отмечается, что бо́льшей склонностью к образованию X-воска на бумаге обладают газовыделяющие масла, в частности, европейские масла и

отечественное масло марки ГК. Образование налёта на фарфоровых покрышках чаще отмечалось при использовании газопоглощающих масел (Т-750, Т-1500, ТК).

Старение ТМ обычно сопровождается разрушением (деградацией) бумажной изоляции, основную массу которой составляет целлюлоза – природный полимер, структурными фрагментами которого являются моносахариды [80, 84, 90 – 92, 99, 100]. В целом, срок работы трансформатора определяется степенью разрушения твёрдой изоляции, поскольку жидкий диэлектрик при эксплуатации может быть заменён и неоднократно.

Старение бумажной изоляции оценивают по уменьшению степени её полимеризации – коэффициенту полимеризации DP. Для новой целлюлозы DP составляет ~ 1100 ед. Нижний предел DP = 250 ед. – отвечает «разламыванию» при изгибе на 180° бумажной изоляции, отмытой от масла [84]. Следует подчеркнуть, что методика предполагает извлечение бумаги из трансформатора.

Отметим, что развиваются «бесконтактные» методики определения состояния изоляции. Так для контроля состояния изоляции высоковольтных вводов введён хроматографический анализ растворенных в масле газов и показатель «оптическая мутность масла» [87, 89]. Однако в работе [88] отмечено, что газовыделяющие масла (типа ГК) в зависимости от заводской партии имеют разные газовыделяющие свойства, вследствие чего возможны ошибки при оценке состояния трансформатора по анализу растворенных в масле газов.

Разработаны методики оценки степени старения изоляции по содержанию в ТМ фурановых соединений – продуктов деструкции моносахаридов. По мнению авторов работ, [83, 84, 101], контроль содержания фуранов является приемлемой альтернативой измерению коэффициента полимеризации изоляции. В то же время в ряде работ отмечается отсутствие строгой и чувствительной концентрационной зависимости содержания фурановых соединений в ТМ и степени старения бумаги [90, 91]. По мнению авторов этих работ, «воздействие электрического поля ускоряет каталитический кислотный алкоголиз целлюлозы при действии гидроксилсодержащих углеводов в присутствии низкомолекулярных кислот

и других продуктов старения целлюлозы. Наличие в масле фурановых соединений может свидетельствовать лишь о локально протекающем процессе деструкции. К тому же, фурановые соединения являются лабильными соединениями и разлагаются в кислой среде с образованием продуктов нефуранового типа».

Установлено [80], что низкомолекулярные органические кислоты, концентрация которых нарастает в ТМ по мере его старения, не вызывают значительного разрушения изоляции, но скорость их образования в масле как вторичных продуктов разложения гидроперекисей служит косвенным указанием на агрессивность такого масла по отношению к бумаге. Следовательно, концентрация низкомолекулярных кислот в ТМ также может быть использована в качестве индикатора состояния бумажной изоляции.

Таким образом, рассмотренный материал выявил следующее.

1. К параметрам состава ТМ, оказывающим наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики, относятся:

~ доля ароматических соединений, определяющая газовыделяющие и газопоглощающие свойства;

~ соотношение нафтеновых и парафиновых компонент, от которого зависят вязкость и температура застывания.

2. Наиболее стабильными к окислению в условиях эксплуатации являются ингибированные ТМ с низким содержанием ароматических углеводородов.

3. Воскообразные осадки в маслах представляют собой продукты старения, природа которых различна для двух типов поверхностей, на которых они отлагаются. Бо'льшей склонностью к образованию X-воска на бумаге обладают газовыделяющие масла; образование налёта на фарфоровых крышках более характерно для газопоглощающих масел. Физико-химические условия, обеспечивающие адсорбцию X-восков на внутренних поверхностях конструкции, не определены.

## 1.6 Выводы по главе

Как итог анализа автор поставил следующие задачи исследований.

– С использованием современных программных продуктов провести ревизию расчётных соотношений действующих методических указаний по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений на примере реальных схем ячеек ОРУ– 500 кВ ПС «Итатская – 1150 кВ».

– Провести анализ и сопоставление с экспериментальными результатами измерений напряжений и токов переходных процессов высокой частоты, сопровождающих коммутации ячеек с измерительными трансформаторами тока.

– Выполнить измерения амплитудно-частотной и переходной характеристик реального ТТ ИМВ 550; синтезировать на основе этих данных простейшую схему замещения ТТ для включения её в расчёты переходных процессов, сопровождающих коммутации подстанционного оборудования разъединителями.

– Разработать и изготовить макет первичной обмотки ТТ ИМВ 550 со слоями изоляции и выравнивающими обкладками; провести измерения амплитудно-частотной характеристики модели и распределения напряжения вдоль витка и каждой из обкладок на импульсном и переменном напряжениях высокой частоты.

– Синтезировать математическую модель макета, используя для настройки экспериментальные данные по распределению напряжения по длине и слоям изоляции, полученные на макете обмотки. На основе полученного верификационного опыта синтезировать полную математическую модель первичной обмотки реального ТТ и с её помощью провести расчёты внутренних перенапряжений, возникающих в изоляции при коммутациях на примере ячеек подстанции «Итатская -1150 кВ».

– Исследовать возможности метода диэлектрической спектроскопии для оценки состояния основной изоляции ТТ.

– Исследовать процессы изменения структуры и свойств трансформаторного масла и продуктов его разложения.

## ГЛАВА 2 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КОММУТАЦИЯХ РАЗЪЕДИНИТЕЛЯМИ

В настоящей главе представлены результаты исследования переходных процессов при коммутациях. Основные результаты опубликованы в работах [112, 116, 118, 119]

### 2.1 Общие сведения

Коммутации в сети выключателями и разъединителями на электростанциях и подстанциях приводят к переходным процессам, при которых возникают высокочастотные перенапряжения (ВЧП). Они образуются в результате высокоскоростной перезарядки ёмкостей шин распределительного устройства. ВЧП возникают:

- в начальные моменты времени при коротких замыканиях на шинах подстанций и при неудалённых коротких замыканиях на присоединениях;
- при работе короткозамыкателей;
- при пробоях межконтактных промежутков выключателей;
- при срабатывании искровых промежутков;
- при коммутациях разъединителями холостых участков шин и маломощных электрических аппаратов: шин ячеек выключателей, обходных систем шин, ячеек с измерительными трансформаторами напряжения и тока, разрядниками и т.д.

Из всех возможных коммутаций следует выделить такую, при которой ВЧП имеют наибольшую амплитуду и частоту воздействия. Такой является коммутация разъединителями холостых участков шин. Данная коммутация сопровождается многократными пробоями промежутка между сходящимися или расходящимися контактами разъединителя. Изменения напряжения в первичной цепи подстанции вызывают в ней переходной процесс с затухающими электромагнитными колебаниями частотой от 50 до 1000 кГц и длительностью от 50 до 500 мкс. Коммутации разъединителями характеризуются многократными повторными зажиганиями дуги, которые могут составлять до нескольких тысяч

таких процессов. Численные значения зависят от характеристик первичной цепи подстанции или станции, от типа разъединителя, конструкции его контактов и их скорости движения, а также связаны с метеорологическими условиями.

Амплитуда колебаний напряжения зависит от размеров межконтактного промежутка и может варьировать в диапазоне от сотен вольт до  $3,5U_{\text{фм}}$ , что уже представляет реальную угрозу для высоковольтного оборудования подстанции особенно для высокочастотных заградителей, измерительных трансформаторов напряжения и тока, вентильных разрядников и ОПН. Отказы оборудования могут привести к системным авариям и недоотпуску электроэнергии потребителям.

К основным мероприятиям по защите от ВЧП можно отнести предотвращение их возникновения в данной схеме сети и применение средств защиты или снижения кратности перенапряжений. Следует отметить, что искровые промежутки, разрядники и ОПН для борьбы с перенапряжениями малоэффективны вследствие резкого подъёма их вольт-секундной характеристики при временах менее микросекунды.

Различия схем распределительных устройств и режимов работы сетей, примыкающих к подстанциям, приводят к значительным разбросам значений максимальных ВЧ перенапряжений, поэтому следует подробно изучить важнейшие факторы, влияющие на них, с помощью математического моделирования.

## 2.2 Механизм генерации и параметры ВЧ перенапряжений

Для разработки точной расчётной модели и способов борьбы с ВЧП, необходимо знать механизм их генерации. Переходный процесс, возникающий при коммутации разъединителя, может быть рассмотрен с помощью эквивалентной схемы, приведённой на рисунке 2.1.

В схеме обозначены  $E_{\text{п}}$  и  $E_{\text{х}}$  – соответственно потенциалы питающей и холостой (коммутируемой) шин. Волновое сопротивление  $Z_0$  моделирует, подключённые воздушные линии электропередачи (ВЛ),  $L_{\text{т}}$  - индуктивность силового трансформатора,  $L_{\text{х}}$  и  $L_{\text{п}}$  – индуктивности питающей и холостой шин.

Ёмкости  $C_x$  и  $C_n$  – ёмкости питающей и холостой шин, вводятся в схему для демонстрации зависимости амплитуды максимальных перенапряжений от соотношения данных ёмкостей. Схема также содержит активную проводимость холостых шин на землю  $G_x$ .

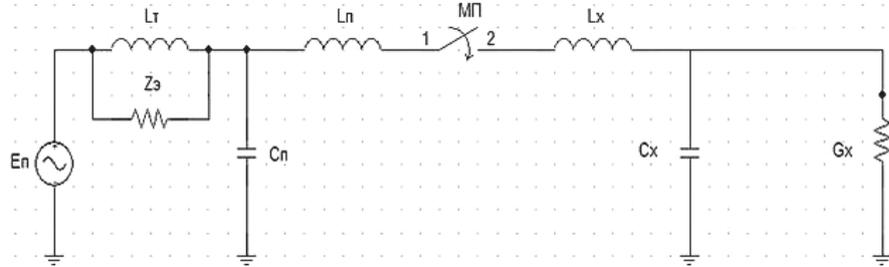


Рисунок 2.1 – Схема замещения участка распределительного устройства при коммутации разъединителем холостых шин

Электрический пробой межконтактного промежутка (МП) разъединителя возникает каждый раз, когда его электрическая прочность  $U_{пр}$ , оказывается меньше разности потенциалов на контактах

$$U_{пр} < E_n - E_x. \quad (2.1)$$

Пробой межконтактного промежутка разъединителя вызывает высокочастотный переходный процесс перезарядки ёмкостей  $C_x$  и  $C_n$ . Подключаемый участок шин приобретает потенциал питающей шины (рисунок 2.2).

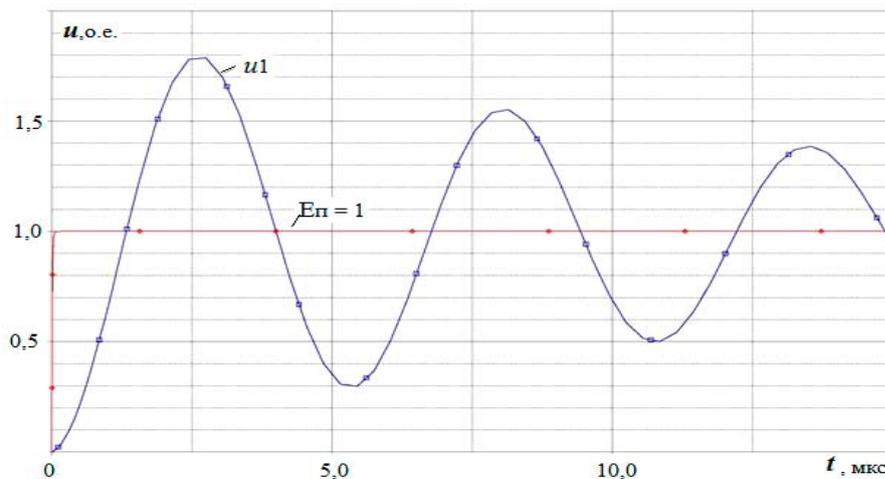


Рисунок 2.2 – Переходный процесс после пробоя межконтактного промежутка разъединителя при отношении  $C_n/C_x=10$

Здесь и далее автор приводит результаты расчётов, которые он выполнил в среде SPICE в порядке актуализации действующих методических указаний по ограничению ВЧП [38]. На этой и последующих расчётных осциллограммах потенциалы  $E$  и напряжения  $U$  приведены в относительных единицах при базисной величине, равной амплитуде фазного напряжения  $U_{\text{фм}}$ .

Из рисунка 2.2 видно, что напряжение (кривая  $U_1$ ) имеет колебательный характер с выраженной первой максимальной амплитудой, которая соответствует значению ВЧП. Частота колебаний достигает нескольких сотен кГц.

В первом приближении напряжение на ёмкости  $C_x$  равно:

$$U_1 = -(E_{\text{п}} - E_{\text{х}}) \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right), \quad (2.2)$$

где  $f$  – частота колебаний переходного процесса, затухающего с постоянного времени  $\tau_1 = (5 - 10)$  мкс:

$$f = \left(2\pi \cdot \sqrt{\frac{L \cdot C_{\text{п}} \cdot C_{\text{х}}}{C_{\text{п}} + C_{\text{х}}}}\right)^{-1}, \quad (2.3)$$

где  $L = L_{\text{п}} + L_{\text{х}}$  – сумма индуктивностей питающей и холостой шин.

Потенциал, который установился бы на шинах после затухания переходного процесса (2.2) при отсутствии подзарядки шин со стороны ВЛ и трансформаторов

$$E' = \frac{E_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}} + E_{\text{х}} \cdot C_{\text{х}}}{C_{\text{п}} + C_{\text{х}}}, \quad (2.4)$$

но подзарядка шин имеет место всегда, и поэтому переходной процесс может развиваться по двум вариантам.

Во-первых, если к питающим шинам подключено  $n$  линий с эквивалентным волновым сопротивлением  $Z_{\text{э}} = Z/n$ , то подзарядка ёмкостей шин происходит по экспоненциальному закону

$$U_{2\text{а}} = -(E_{\text{п}} - E_{\text{х}}) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (2.5)$$

где  $\tau_2$  – постоянная времени, равная  $Z_{\text{э}} \cdot (C_{\text{п}} + C_{\text{х}})$  и имеющая порядок значений  $(10^{-6} - 10^{-7})$  с.

Переходный процесс (2.5) практически заканчивается до наступления максимума ВЧ перенапряжения. Величина напряжения в этом случае составит

$$U = E_{\Pi} + U_1 + U_{2a}. \quad (2.6)$$

Характер общего переходного процесса на холостых коммутируемых шинах определяется величинами  $E_{\Pi}$  и  $U_1$ , а ток, протекающий через дугу между контактами разъединителя, вызванный высокочастотной составляющей  $U_1$ , проходит через нулевые значения в моменты максимумов и минимумов  $U_1$ , где создаются условия для гашения дуги. В большинстве случаев гашение дуги наблюдается после затухания высокочастотного процесса (2.2), но в ряде случаев возможны гашения дуги в один из моментов прохождения высокочастотного тока через нуль.

Второй вариант развития переходного процесса возникает, если гашение дуги происходит после затухания высокочастотного переходного процесса. В момент гашения дуги на обеих шинах имеет место потенциал  $U_{\kappa} \leq U_{\text{фм}}$ . Затем потенциал на холостой шине снижается по экспоненциальному закону

$$E_{\kappa} = E_{\Pi} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right), \quad (2.7)$$

где  $\tau_3$  – постоянная времени, которая зависит от суммарной активной проводимости холостых шин на землю,  $\tau_3 = C_{\kappa}/G_{\kappa}$ . Естественная проводимость изоляции шин обеспечивает изменение постоянной в диапазоне  $\tau_3 = (0,02 - 0,09)$  с.

На питающих шинах напряжение после погасания дуги меняется с частотой 50 Гц. Процессы на шинах идут независимо до момента  $t$ , где разность потенциалов  $E_{\Pi} - E_{\kappa}$  вновь превысит пробивное напряжение межконтактного промежутка разъединителя  $U_{\text{пр1}}$ . Промежуток пробивается, и цикл переходных процессов повторяется.

Как можно видеть из (2.2) – (2.6), одним из влияющих на значения перенапряжений факторов является соотношение ёмкостей питающей и холостых шин. Проверим данное утверждение, с помощью расчётной модели (рисунок 2.1).

На рисунке 2.2 была приведена осциллограмма переходного процесса при  $C_{\Pi} \gg C_{\kappa}$ . Данное соотношение ёмкостей характерно для коммутации разъединителями коротких холостых шин в ячейках выключателей, разрядников и

т.д. Амплитуда высокочастотной составляющей  $U_{1м}$  и полная амплитуда перенапряжений  $U_m$  имеют наибольшие значения.

Теперь смоделируем процесс, когда  $C_{п} \approx C_{х}$ . Это коммутация разъединителем равных по длине шин. Как видно из рисунка 2.3, в данном случае амплитуда перенапряжений минимальна.

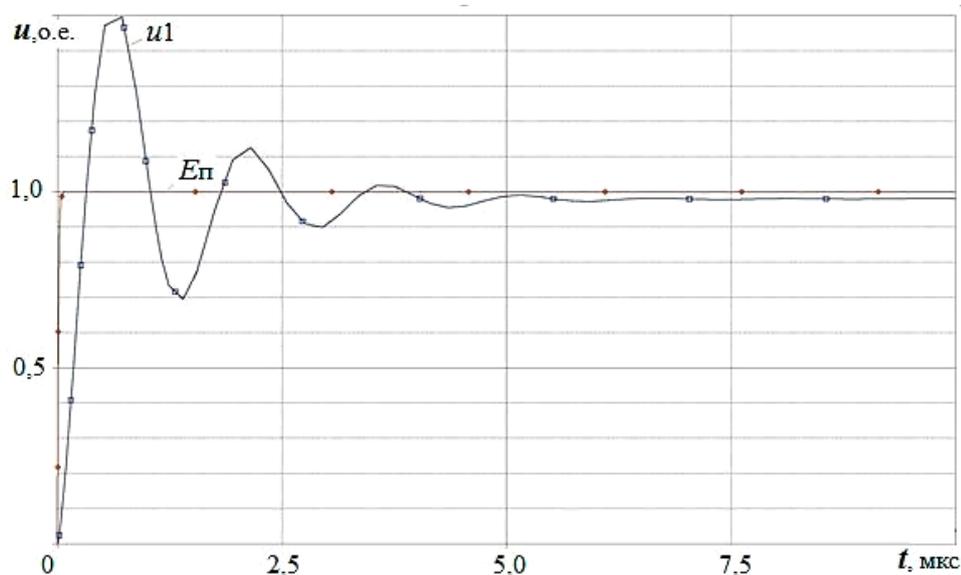


Рисунок 2.3 – Переходный процесс после пробоя межконтактного промежутка разъединителя при  $C_{п}/C_{х}=1$

Далее рассмотрим схему при  $C_{п} < C_{х}$ , когда коммутируется разъединителем протяженная система шин. Амплитуда перенапряжения вновь возрастает, но меньше, чем в случае  $C_{п} \gg C_{х}$  (рисунок 2.4).

Также наиболее высокие напряжения возникают, если на холостой шине в момент пробоя межконтактного промежутка разъединителя остался потенциал противоположной полярности  $E_{п} = -E_{х}$ .

В итоге, максимальную интенсивность переходные процессы приобретают в коммутации отключения разъединителя при таких расстояниях между контактами, когда пробои следуют через полпериода промышленной частоты в максимумы фазного напряжения на питающих шинах ( $U_{п} = U_{фм}$ ). При этом значения перенапряжений определяются соотношением ёмкостей шин,  $C_{п}/C_{х}$ , а также величиной и знаком остаточного потенциала  $E_{х}$ .

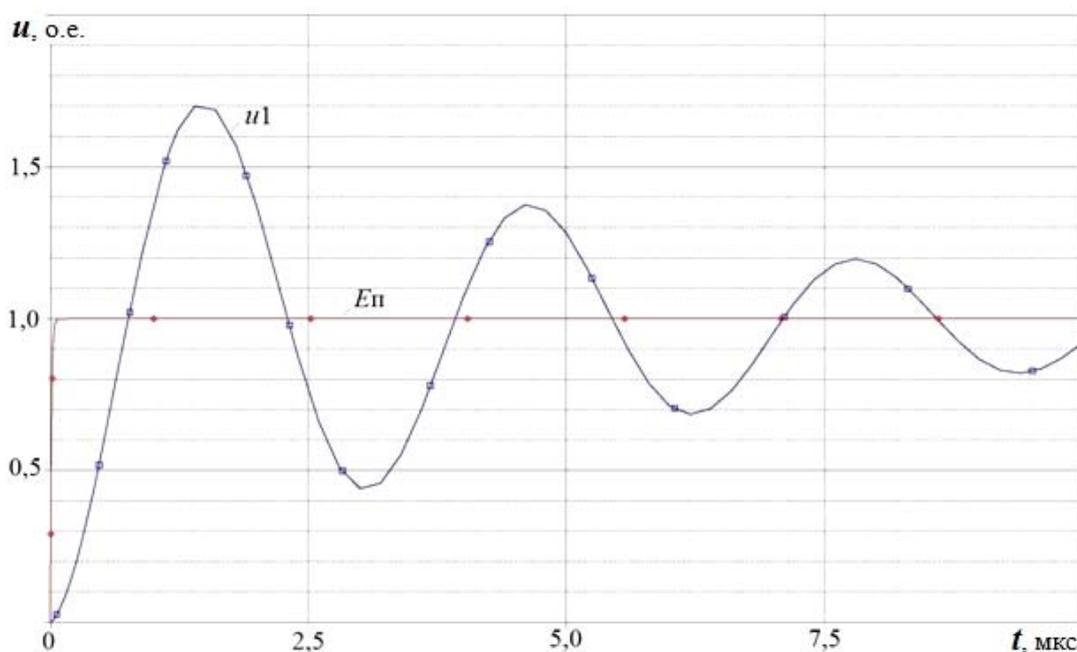


Рисунок 2.4 – Переходной процесс после пробоя межконтактного промежутка разъединителя при  $C_{п} / C_{х} = 0,5$

Такая же зависимость была приведена в [38]. Для наглядности значения, рассмотренных выше величин, показаны в таблице 2.1. В верхней части таблицы приведены параметры переходных процессов для случая естественной проводимости изоляции холостой шины ( $T_3 = 0,028$  с), когда остаточный потенциал в соответствии с (2.7) к моменту следующего пробоя снижается на 30 %.

В нижней части таблицы 2.1 параметры переходных процессов даны для случая полного снятия заряда с коммутируемой холостой шины между двумя последовательными пробоями межконтактного промежутка разъединителя, что может быть достигнуто, например, установкой на холостых шинах электромагнитных трансформаторов напряжения или иным способом, ведущим к повышению проводимости  $G_x$  в (2.7). Снятие заряда сокращает значение пробиваемого межконтактного промежутка разъединителя на 60 %. Соответственно сокращается число генерируемых высокочастотных процессов за одну коммутацию разъединителя и на (25 – 40) % снижаются амплитуды переходных процессов.

Таблица 2.1 – Параметры переходных процессов при отключении холостых шин разъединителями 110 кВ и выше для случая подпитки от ВЛ

$C_{\Pi}/C_{\text{X}}$	$E_{\Pi}$ отн. ед.	$E_{\text{X}}$ отн. ед.	$U_{\text{пр}}$ отн. ед.	$E$ отн. ед.	$U_{\text{M}}$ отн. ед.	$U_{1\text{M}}$ отн. ед.
10	1	-0,7	1,7	0,85	2,4	1,6
4	1	-0,7	1,7	0,66	2,2	1,4
2	1	-0,7	1,7	0,43	2,0	1,1
1	1	-0,7	1,7	0,15	1,8	0,9
0,75	1	-0,7	1,7	0	1,8	1
0,5	1	-0,7	1,7	-0,13	1,9	1,1
10	1	0	1	0,91	1,7	0,9
2	1	0	1	0,67	1,6	0,8
1	1	0	1	0,50	1,4	0,5
0,5	1	0	1	0,33	1,6	0,7

Рассмотрим теперь переходной процесс для случая, когда гашение дуги происходит при незавершённом высокочастотном процессе (2.2) в один из моментов прохождения через нуль тока высокой частоты (точки А, В на рисунке 2.5), если частота высокочастотного процесса невелика:  $F < 300$  кГц, а собственные частоты коммутируемых шин близки друг к другу

$$F_{\Pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{\Pi} \cdot C_{\Pi}}} \approx F_{\text{X}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{\text{X}} \cdot C_{\text{X}}}}. \quad (2.8)$$

Определить момент гашения дуги и значение остаточного потенциала  $E_{\text{X}}$  и значения перенапряжений в данном случае затруднительно. При гашении дуги в точках максимумов переходного напряжения (точки В на рисунке 2.5) на холостых шинах остаётся потенциал  $E_{\text{ХЗ}} < E_{\Pi} \leq U_{\text{ФМ}}$ . Последующие пробои будут сопровождаться умеренными значениями перенапряжений.

При гашении дуги в точках максимумов переходного напряжения (точки А на рисунке 2.5) остаточный потенциал на холостых шинах  $E_{\text{ХЗ}} > E_{\Pi}$ . Последующие пробои сопровождаются высокими значениями перенапряжений и заканчиваются при повышенных межконтактных расстояниях ( $U_{\text{пр}} < 2U_{\text{ФМ}}$ ).

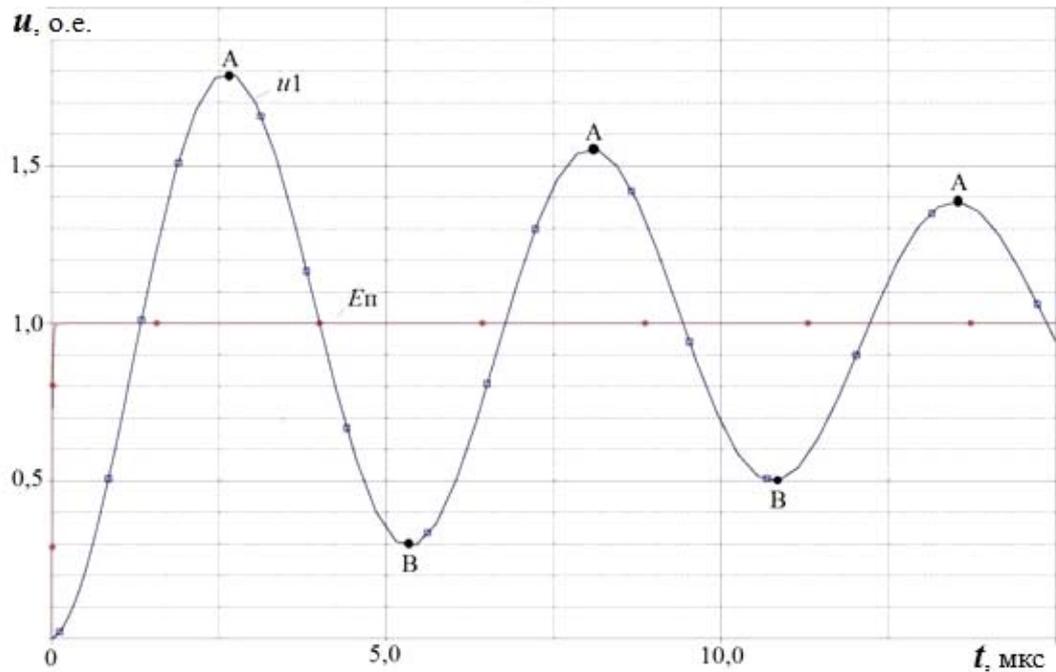


Рисунок 2.5 – Переходной процесс после пробоя межконтактного промежутка разъединителя

Анализируя (2.8), нетрудно заметить, что данное равенство соответствует условию  $C_{\pi} \approx C_{\kappa}$ , когда наблюдаются минимальные перенапряжения для случая гашения дуги после затухания высокочастотного переходного процесса. Одновременно возникает вероятность погасания дуги во время переходного процесса с генерацией повышенных перенапряжений. В связи с этим данный случай на практике нежелателен. Целесообразно развести собственные частоты (2.8) питающих и холостых шин путём изменения длин коммутируемых шин, установкой дополнительных ёмкостей или продольных реакторов.

На практике возможен также случай, когда питающие шины не имеют присоединённых ВЛ, а получают питание от трансформаторов или автотрансформаторов. В данном примере, после пробоя межконтактного промежутка разъединителя вместо апериодического процесса подзарядки ёмкостей шин (2.5) будет наблюдаться периодический процесс, который упрощённо представляется зависимостью

$$U_{2\pi} = -(E_{\pi} - E) \cdot \cos(2 \cdot p \cdot F_{\pi} \cdot t) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_d}\right), \quad (2.9)$$

где  $F_{\pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{\pi} \cdot C}}$ ;  $C = C_{\pi} + C_{\kappa}$  – сумма ёмкостей питающей и холостой шин.

Частота  $F_n$  имеет порядок  $10^{-3} - 10^{-4}$  Гц. Полный переходный процесс изменения напряжения будет равен

$$U = E_n + U_1 + U_{2п}. \quad (2.10)$$

Ток, протекающий через дугу между контактами разъединителя, представляет собой сумму высокочастотного и низкочастотного токов, соответствующих переходным напряжениям (2.2) и (2.9).

Гашение дуги в большинстве случаев происходит после затухания высокочастотного процесса в один из моментов прохождения через нуль тока низкой частоты. Как правило, дуга гаснет в точках максимумов низкочастотных колебаний напряжения при  $U > E_n$ . Гашения в минимумы низкочастотных переходных напряжений затруднены повышенными восстанавливающимися напряжениями на контактах разъединителя.

После гашения дуги на холостых шинах остаётся повышенный потенциал  $E_x > E_n \leq U_{фм}$ , значение которого определяется амплитудой низкочастотных колебаний (2.9) и также зависит от соотношения  $C_n/C_x$ .

Если  $C_n \gg C_x$  (коммутация трансформаторным разъединителем коротких холостых шин в ячейке трансформаторного выключателя), амплитуды низкочастотных переходных напряжений  $U_{2п}$  малы, и разряды между контактами разъединителя прекращаются при  $U_{пр} < 2U_{фм}$ . По амплитудам переходных процессов этот случай практически соответствует коммутации разъединителями коротких холостых шин в ячейках выключателей и разрядников.

При  $C_n \approx C_x$  перенапряжения минимальны, но амплитуда низкочастотной составляющей  $U_{2п}$  превышает амплитуду фазного напряжения.

Наиболее неблагоприятным является случай  $C_n < C_x$  (коммутация разъединителем маломощного трансформатора на протяжённую обходную систему шин без нагрузки). При таких коммутациях помимо высоких амплитуд ВЧ-перенапряжений возникают и низкочастотные перенапряжения, амплитуды которых могут достигать (2 – 2,5)  $2U_{фм}$ . Значения параметров переходных процессов для рассмотренного случая показаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры переходных процессов при отключении холостых шин разъединителями 110 кВ и выше для случая питания от трансформатора

$C_{\text{п}}/C_{\text{х}}$	$E_{\text{п}}\text{о.е.}$	$E_{\text{х}}\text{о.е.}$	$U_{\text{пр}}\text{о.е.}$	$E\text{о.е.}$	$U_{2\text{пм}}\text{о.е.}$	$U_{\text{нч}}\text{о.е.}$	$U_{\text{м}}\text{о.е.}$	$U_{1\text{м}}\text{о.е.}$
10	1	-0,79	1,79	0,84	0,16	1,1	2,3	1,63
4	1	-0,91	1,91	0,62	0,38	1,3	2,1	1,53
2	1	-1,09	2,09	0,30	0,70	1,6	1,4	1,39
1	1	-1,36	2,36	-0,18	1,18	2,1	1,2	1,18
0,75	1	-1,50	2,50	-0,43	1,43	2,3	1,6	1,43
0,5	1	-1,71	2,71	-0,81	1,81	2,6	2,4	1,81
0,4	1	-1,83	2,83	-1,00	2,00	2,8	2,8	2,00
10	1	0	1	0,91	0,09	1	1,73	0,91
2	1	0	1	0,80	0,20	1,2	1,52	0,80
1	1	0	1	0,50	0,50	1,5	0,95	0,50
0,5	1	0	1	0,33	0,67	1,6	0,63	0,67
0,4	1	0	1	0,29	0,71	1,6	0,55	0,71

Принудительное снятие заряда  $E_{\text{х}}$  в (2 – 3) раза снижает как высокочастотные ( $U_{\text{м}}$ ), так и низкочастотные ( $U_{\text{нч}}$ ) перенапряжения. На (40 – 60) % сокращается величина пробиваемого межконтактного промежутка разъединителя.

Системы шин крупных подстанций с числом ячеек 10 и более имеют протяжённость в несколько сотен метров. По отношению к высокочастотному процессу (2.3) длинные шины являются длинными линиями и могут иметь резонансные точки. Если на одном конце таких шин производится коммутация разъединителем холостых шин малой протяжённости (коммутация шинного разъединителя выключателя), то на достаточном удалении от места коммутации могут возникнуть свободные колебания с резонансной частотой повышенной кратности.

Проявлению резонанса способствует отсутствие между местом коммутации и резонансной точкой межшинных соединений, линейных или трансформаторных присоединений, продольных реакторов, ёмкостных трансформаторов напряжения.

Приведённые выше выражения (2.1) – (2.10) точно отражают механизм генерации ВЧ перенапряжений и относительное изменение их амплитуд в зависимости от условий коммутаций, но для отображения абсолютных значений

перенапряжений они недостаточны. Для этой цели необходимы расчёты переходных процессов при моделировании шин подстанций линиями с распределёнными параметрами с учётом реального расположения оборудования.

Приближённая оценка ожидаемых амплитуд ВЧ перенапряжений может быть выполнена по эмпирическому выражению (2.11):

$$U_{\text{вч}} = K_y \cdot (U_{\text{фм}} - U_x) + E_x = K_y \cdot U_{\text{пр}} + E_x, \quad (2.11)$$

где  $K_y$  – ударный коэффициент.

Значения  $E_x$ ,  $U_{\text{пр}}$  принимаются по таблице 2.1, а значения  $K_y$  – по таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения ударных коэффициентов для оценки амплитуд ВЧ перенапряжений

Место оценки амплитуды ВЧ-перенапряжений	Ударный коэффициент
Разомкнутые концы шин	1,7 – 2,1
Высокочастотные заградители	1,5 – 2,1
Промежуточные точки шин	1,5 – 1,9
Коммутируемый разъединитель при:	
$C_n \gg C_x$	1,7 – 2,1
$C_n \leq C_x$	1,3 – 1,4
Силовой трансформатор	1,1 – 1,2
Ёмкостный трансформатор напряжения	1,1 – 1,2

Условия работы разъединителей, коммутирующих участки холостых шин на подстанциях 110 кВ и выше, число и частоты, генерируемых высокочастотных переходных процессов приведены в таблице 2.4 [38].

Таблица 2.4 – Условия работы разъединителей при коммутации холостых шин на подстанциях 110 кВ и выше, число и частоты перенапряжений

Наименование	Класс напряжения, кВ					
	110	220	330	500	750	1150
Максимальные пробиваемые межконтактные расстояния, см,						
при отключении	15-45	30-90	55-120	110-180	135-260	170-400
при включении	20	45	60	95	140	220

## Продолжение таблицы 2.4

Максимальная разность потенциалов на контактах, кВ, - при отключении - при включении	90-250	180-500	270-680	410- 980	610-1460	940-2250
	120	230	350	530	790	1200
Число ВЧ перенапряжений, близких к максимальным, при коммутации фазы разъединителя электроприводом, не менее	5	10	20	20	30	50
Диапазоны частот, генерируемых высокочастотных переходных процессов, кГц	200 – 1000		100 – 800		50 – 600	

### 2.3 Экспериментальные исследования перенапряжений и токов при коммутациях разъединителями ячеек с трансформаторами тока

Регистрация ВЧ перенапряжений и токов, протекающих через изоляцию трансформатора тока (ТТ) в момент коммутаций выключателями и разъединителями, проводилась при плановом выводе в ремонт автотрансформатора 6АТ на ОРУ 500 кВ ПС «Итатская – 1150 кВ».

Согласно типовому бланку переключений сначала выключаются выключатели В 6АТ и В 519-6АТ, затем шинный разъединитель ШР 6АТ, разъединитель Р 6АТ, разъединители ШР и Р В 519-6АТ и, в последнюю очередь, линейные разъединители 6АТ. В соответствии с логикой переключений, наибольшие ВЧ перенапряжения ожидалось при отключениях шинных разъединителей ШР-6АТ. Поэтому все измерения были выполнены на фазе «А» ТТ 6АТ, включенном между В 6АТ и ШР 6АТ той же фазы. Тип ТТ – ИМВ 550. Схема измерений приведена на рисунке 2.6.

Датчик напряжения представлял собой ёмкостной делитель. В качестве верхнего плеча использовалась паразитная ёмкость пластины фольгированного

стеклотекстолита на шины и верхние элементы конструкций В, ТТ и ШР, находящиеся под потенциалом. Ёмкостной зонд через короткий кабель (40 см) нагружался на ёмкость нижнего плеча, собранную из четырёх конденсаторов с ёмкостью по 47 нФ каждый, соединённых параллельно. Конструктивно нижнее плечо было выполнено в коаксиальном металлическом корпусе с входным и выходным разъёмами СР-50 и включалось непосредственно на 1-й вход осциллографа TDS 220.

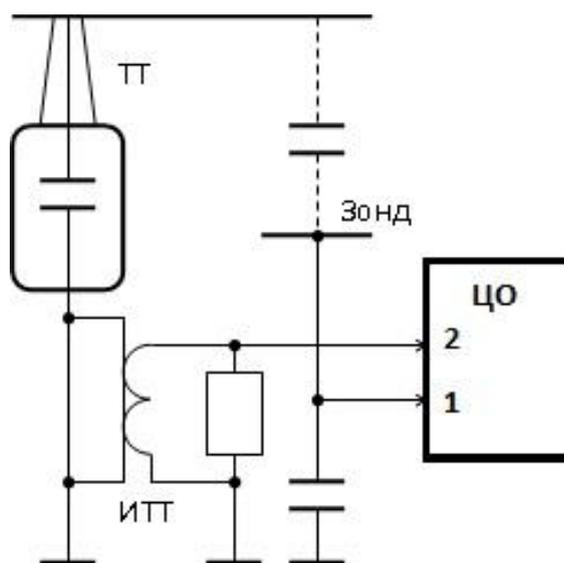


Рисунок 2.6– Электрическая схема измерений напряжения и тока

На второй вход осциллографа подавался сигнал с импульсного трансформатора тока (ИТТ). Включение первичной обмотки ИТТ производилось в рассечку дополнительного заземляющего проводника, который верхним концом подключался к точке присоединения рабочего заземляющего спуска ТТ, а нижним к этому же спуску, но на 1,5 метра ниже. Таким образом в ИТТ ответвлялась малая часть от общего тока протекающего по цепи «шины – ёмкость изоляции ТТ – вывод нулевой обкладки + бак – металлическая рамная конструкция – заземляющий спуск – контур заземления ОРУ». Все элементы схемы (кроме ёмкостного зонда) были помещены в металлический кожух, который крепился на уровне чуть ниже верхней опорной рамы ТТ и заземлялся там же. Ёмкостной зонд располагался на верхней стенке, а ИТТ снаружи кожуха.

Для количественной оценки доли ответвляющегося в ИТТ тока была проведена соответствующая градуировка. С помощью генератора ГЗИ-6 (на

выходе генератора вырабатывался биэкспоненциальный импульс напряжения с амплитудой + 260 В) и резистора с сопротивлением 51 Ом, включённым последовательно формировался импульсный ток с амплитудой 5,1 А. Он подавался в точку присоединения заземляющего спуска к баку ТТ. На выходе ИТТ регистрировался сигнал с амплитудой 153,3 мВ (рисунок 2.7), что при нагрузке 10 Ом соответствовало протекающему через ИТТ току 28,3 мА или 0,555 % от общего тока.

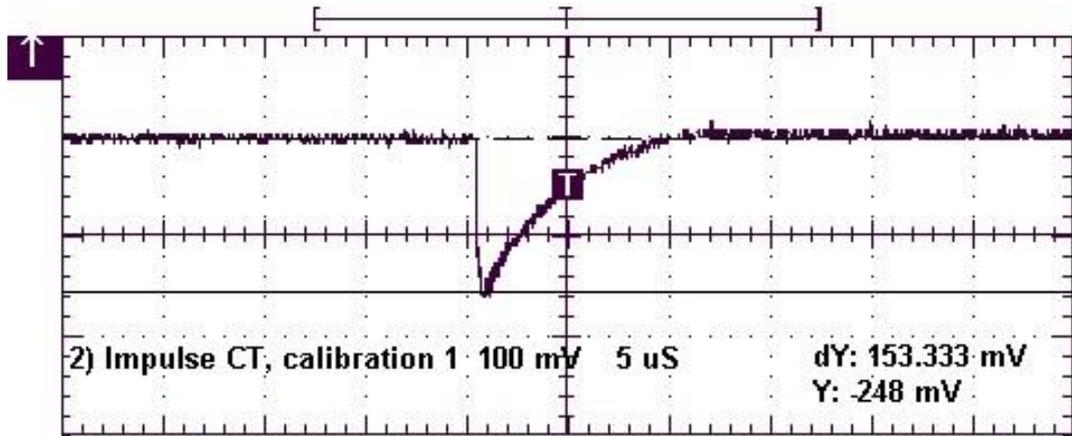


Рисунок 2.7– Осциллограмма напряжения на выходе ИТТ при градуировке

Коэффициент деления определили по осциллограмме напряжения и показаниям вольтметров на щите подстанции. На момент переключений на шинах действовало линейное напряжение 514,6 кВ. Согласно осциллограмме напряжения, на нижнем плече ёмкостного зонда размах, между амплитудными значениями напряжения в полупериоды положительной и отрицательной полярности составлял 266,667 мВ. Соответственно, коэффициент деления по напряжению получили равным:  $K_{\text{дел}} = 514,6 \text{ кВ} : \sqrt{3} \cdot 2 \cdot \sqrt{2} : 266,667 \text{ мВ} = 3,15 \cdot 10^6$ .

### Результаты регистрации переходных процессов

*Отключение выключателя.* На осциллограмме напряжения (рисунок 2.8) была зафиксирована синусоида с тремя импульсами.

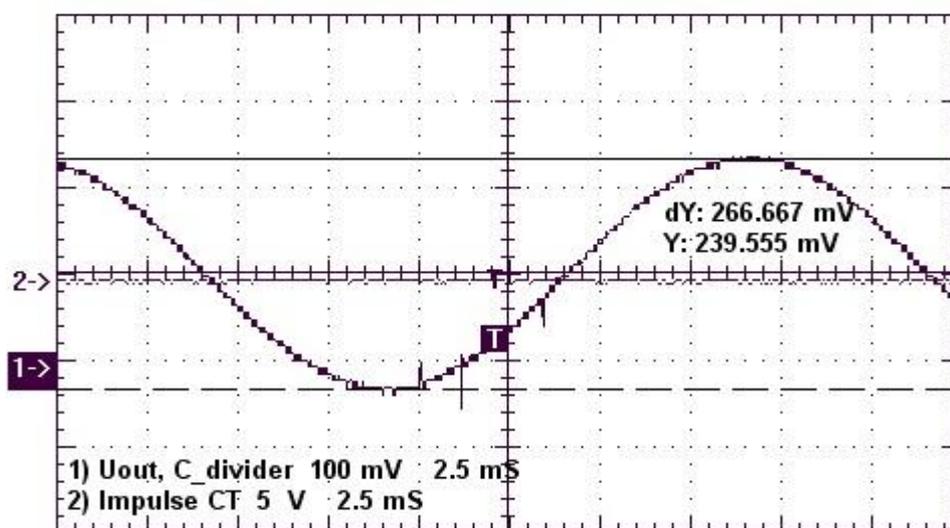


Рисунок 2.8– Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) при отключении выключателя В 6АТ

Два импульса имели разную полярность и амплитуду около 90 кВ, ещё один импульс между этими двумя имел амплитуду около 150 кВ. По-видимому, все эти короткие импульсы были связаны с процессами гашения и обрыва тока дуги в камерах выключателя или попытками повторного её зажигания. На выходе ИТТ сигнал был, но из-за очень короткой (для выбранной скорости развёртки) длительности и малой величины он не был зарегистрирован.

*Коммутации разъединителей.* На разъединителе ШР 6АТ фазы «А» в однофазном режиме было выполнено 2 операции отключения и 2 операции включения. Третье (последнее) отключение было выполнено в трёхфазном режиме. При всех коммутациях разъединителя уровень запуска по первому каналу был выставлен на +140 мВ или  $1,05 U_m$ . Перед отключением ШР в осциллографе устанавливался режим запуска развёртки «Периодический», а перед включением ШР - «Однократный». Это было сделано для того, чтобы регистрировались максимальные значения перенапряжений и токов: при отключении ШР фиксировались осциллограммы последних пробоев межконтактного промежутка разъединителя, а при включении – первых пробоев.

От опыта к опыту менялись скорости развёртки. При первом отключении использовалась развёртка 2,5 мс/дел. На осциллограмме напряжения (рисунок 2.9)

наблюдалась «классическая» картина перезарядки ёмкости ТТ при искровых пробоях и сохранения заряда во время паузы между пробоями.

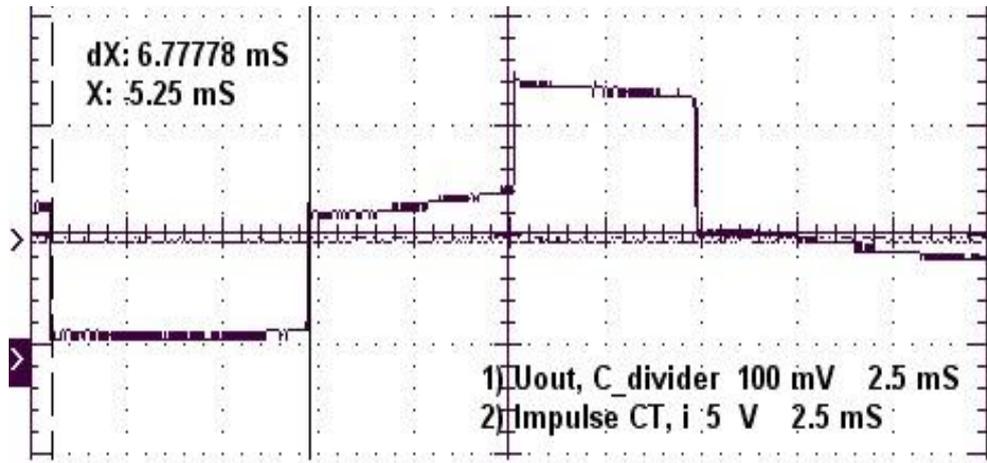
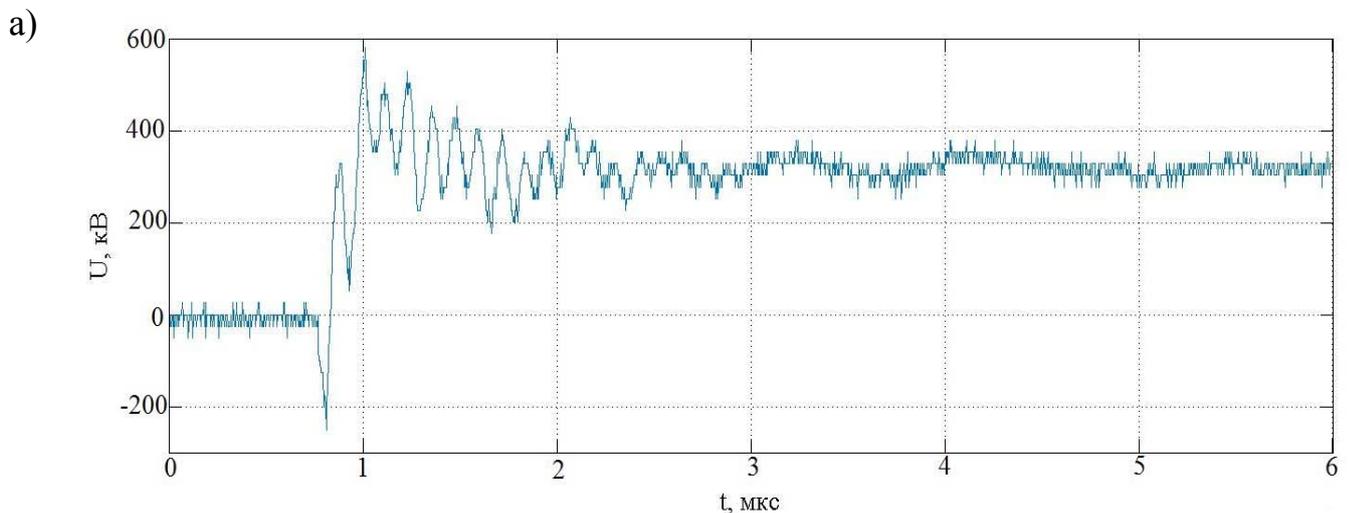


Рисунок 2.9– Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) при однофазном отключении ШР 6АТ (полярность сигналов тока – обратная)

Первая пауза отмечена на осциллограмме курсорами и составляла  $\Delta T_1 = 6,8$  мс; вторая,  $\Delta T_2 = 5,4$  мс; третья,  $\Delta T_3 = 4,8$  мс и четвёртая, максимальная – не менее (т.к. конец паузы не вошёл в осциллограмму)  $\Delta T_4 = 7,6$  мс. Скачки напряжения составили: первый,  $\Delta U_1 = - 364$  кВ; второй,  $\Delta U_2 = + 364$  кВ; третий,  $\Delta U_3 = + 308$  кВ и четвёртый, оказавшийся максимальным,  $\Delta U_4 = - 482$  кВ, что соответствует кратности около 1,15  $U_m$ . Максимальный общий размах между ступеньками за время регистрации (25 мс) составил 1,72 $U_m$ .

Временные характеристики переходного процесса хорошо прослеживаются на осциллограммах с высокой скоростью развёртки (рисунок 2.10).



б)

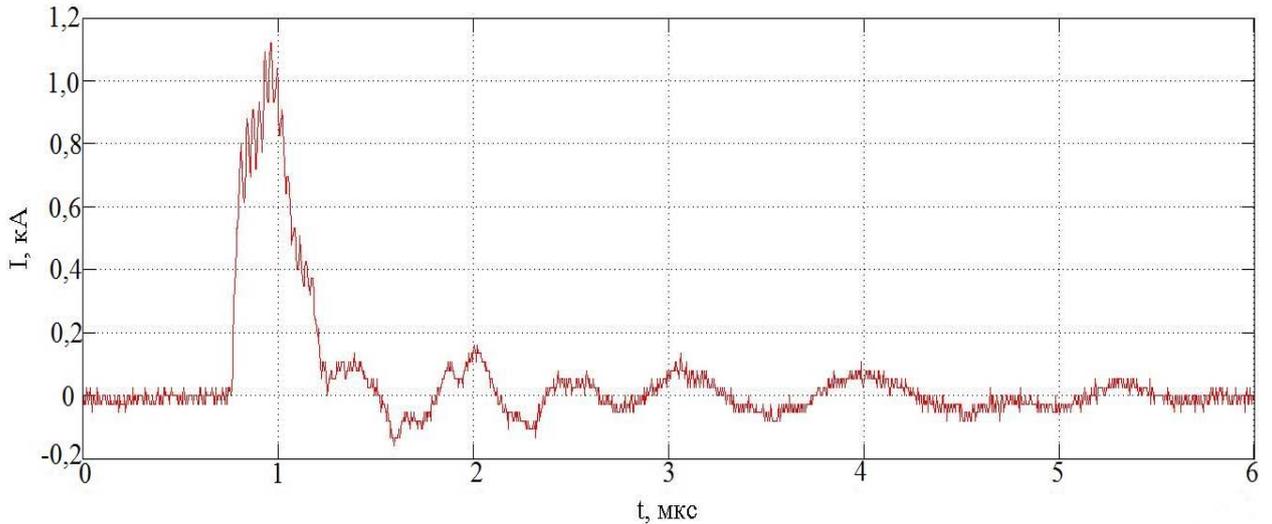


Рисунок 2.10– Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) при трёхфазном включении ШР 6АТ

Длительность фронта скачка напряжения составляла  $T_{\text{фр.}U} = 0,4$  мкс. Амплитуда тока, протекавшего с шины через изоляцию ТТ в контур заземления, составляла  $I_m = 1182$  А, а скорости нарастания тока составляли  $7,57$  кА/мкс и  $1,06$  кА/мкс на начальном и втором участках соответственно.

На данных осциллограммах напряжения и тока (рисунок 2.10) прослеживаются явно выраженные колебания с несколькими частотами. Для выявления данных частот провели спектральный анализ, полученных осциллограмм, используя дискретное преобразование Фурье в пакете MATLAB. В результате получили гистограммы исходных спектров частот напряжения (рисунок 2.11) и тока (рисунок 2.15).

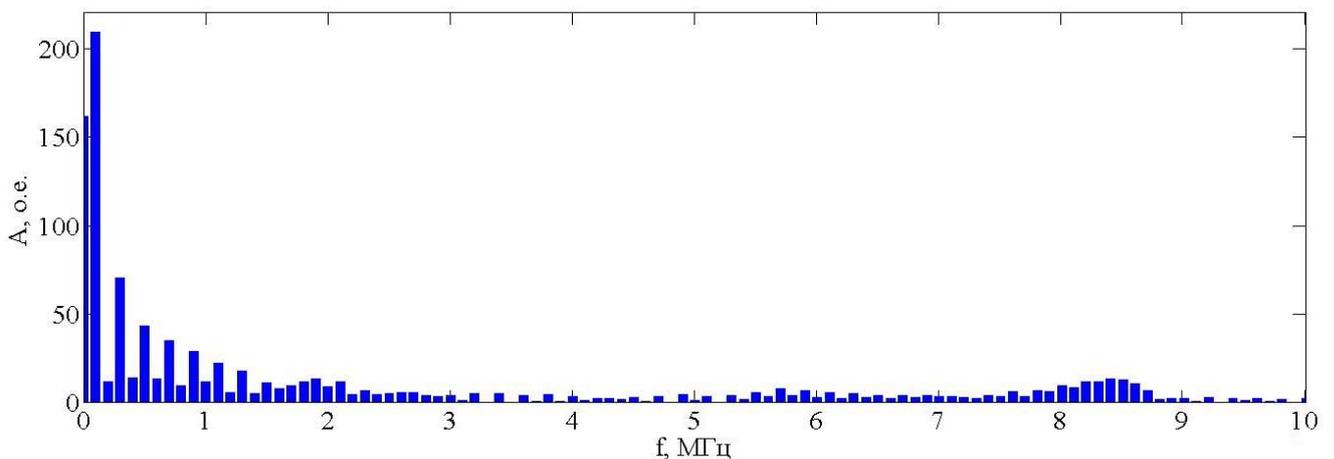


Рисунок 2.11– Спектр напряжения при коммутации ШР 6АТ

В данном амплитудно-частотном спектре прослеживаются явные пики на частотах 1,9 МГц и 8,4 МГц. Чтобы проверить найденные основные составляющие спектра с помощью дискретного преобразования Фурье, которые присутствуют в осциллограмме напряжения, было принято решение воспользоваться еще одним методом цифровой обработки сигналов. Для этого использовали вейвлет-преобразование. Главное отличие данного преобразования от преобразования Фурье в том, что вейвлеты показывают не только какие составляющие присутствуют в сигнале, но и в каком временном промежутке спектра они находятся.

В качестве базисного вейвлета взяли вейвлет Морле (2.12). Это комплексный вейвлет наиболее широко используется для цифровой обработки сигналов, так как он хорошо локализован и во временной и в частотной областях сигнала (рисунок 2.12).

$$\psi(t) = \exp(iat - \frac{t^2}{2}) \quad (2.12)$$

где  $a$  - пересчитываемое значение его масштабирующей переменной. Вещественная и мнимая части данного вейвлета  $\psi(t)$  – это амплитудно-модулированные колебания.



Рисунок 2.12– Вейвлет Морле

В связи с этим, провели повторный спектральный анализ также в пакете MATLAB. Результаты приведены на рисунках 2.13-2.14.

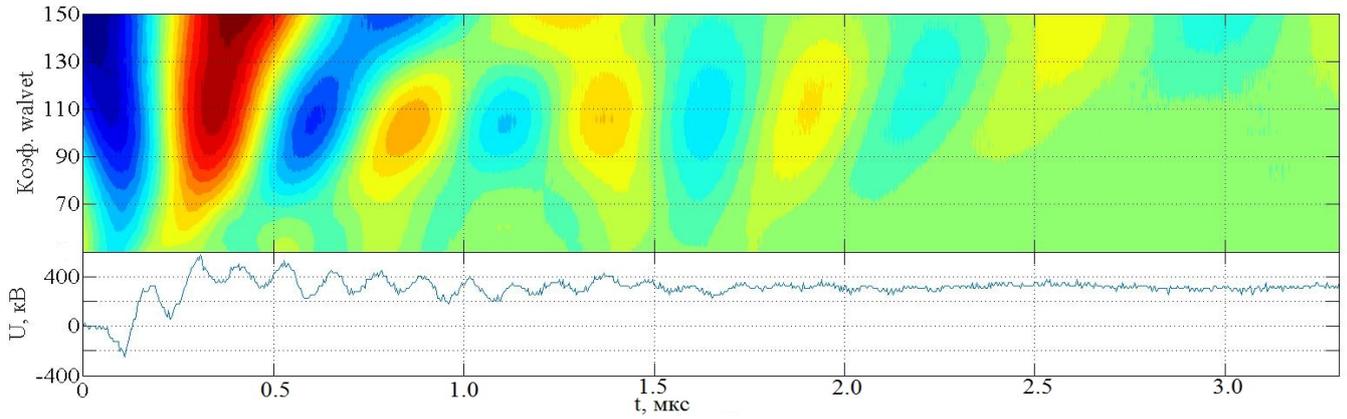


Рисунок 2.13– Вейвлет-преобразование сигнала напряжения при трёхфазном включении ШР 6АТ ( $f=1,9$  МГц)

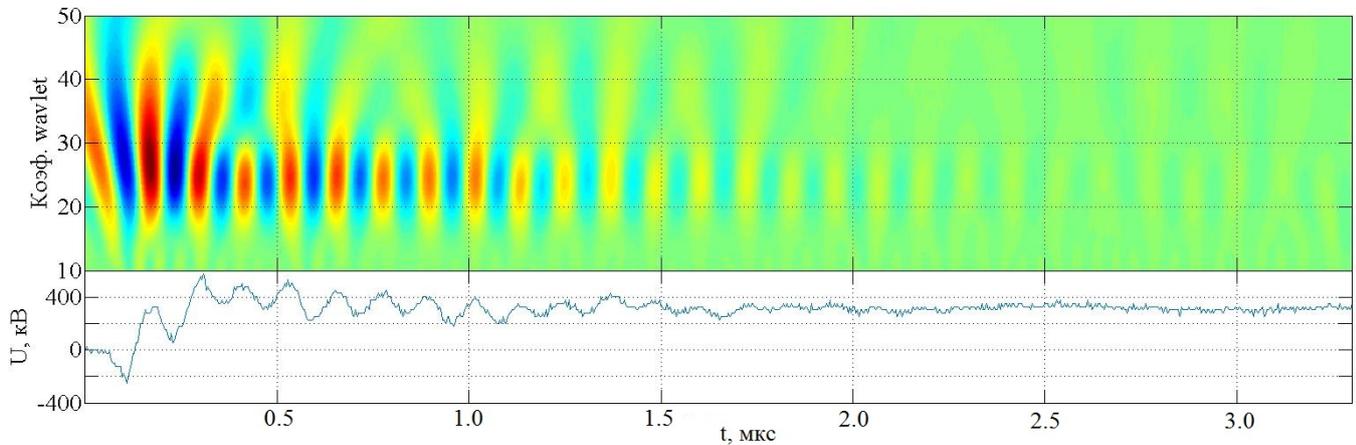


Рисунок 2.14– Вейвлет-преобразование сигнала напряжения при трёхфазном включении ШР 6АТ ( $f=8,4$  МГц)

Поскольку операция преобразования сигнала, осуществляется с помощью масштабирующей переменной вейвлета, это приводит к растяжению или сжатию базового вейвлета в  $a$  раз. Следовательно, после данной операции частота центрального всплеска вейвлета также изменяется в равное число раз. Поэтому в основе алгоритма пересчета масштабирующей переменной, реализованного в пакете MATLAB, лежит процедура определения центральной частоты вейвлета, значение которой равно частоте гармоники, наилучшим образом аппроксимирующей его центральный всплеск. Формула для определения частоты вейвлета (2.13):

$$f_a = \frac{f_a}{a \cdot \Delta t} \quad (2.13)$$

где  $fa$  - псевдочастота вейвлета, Гц,  $\Delta t$  - шаг дискретизации,  $fc$  - частота центрального всплеска вейвлета, Гц.

Идентификация частот гармонических составляющих сводится к определению значения масштабирующей переменной вейвлета, соответствующего локальному максимуму энергии вейвлет-спектра сигнала, а также простому пересчету этого значения в частоту. В нашем случае максимальная энергия прослеживается при коэффициенте  $a=145$  (рисунок 2.13) и  $a=24$  (рисунок 2.14), что в переводе дает нам частоты 1,8 МГц и 8,4 МГц, соответственно.

Предположим, что частота 8,4 МГц связана с какими-то процессами в выключателе ВНВ -500, который «раскачивает» контур «эквивалентная емкость выключателя - ТТ - индуктивность шины между ними». При отключенном положении ВНВ-500 моделируется емкостью 1400 пФ. Выключатель имеет четыре разрыва, поэтому  $C = 1400:4 = 350$  пФ. Емкость ТТ  $\approx 1250$  пФ. Их последовательное соединение дает  $C_{\text{экв}} \approx 270$  пФ. При индуктивности шины (длина около 2 метров) немногим более 1 мкГн получаем резонансную частоту близкую к 8 МГц.

Колебания плохо прослеживаются в осциллограмме напряжения (рисунок 2.10а), поэтому был измерен ток, протекающий внутри трансформатор тока при данной коммутации разъединителя. В осциллограмме тока (рисунок 2.10б) эти колебания просматриваются намного лучше. Для нахождения частот этих колебаний, также провели цифровую обработку теперь уже сигнала тока.

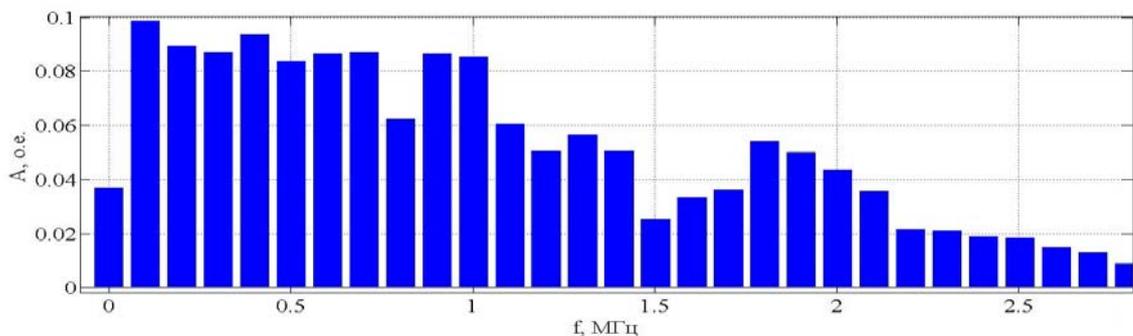


Рисунок 2.15– Спектр тока при трёхфазном выключении ШР 6АТ

Анализ амплитудно-частотного спектра тока (рисунок 2.15) с помощью дискретного преобразования Фурье оказался еще более затруднительным и поэтому здесь также было принято решение прибегнуть дополнительно к помощи вейвлет-преобразования. Результаты представлены на рисунках 2.16-2.18.

В данном случае максимальная энергия выделяется при коэффициентах  $a=138$  (рисунок 2.16),  $a=230$  (рисунок 2.17) и  $a=6,5$  (рисунок 2.18), что в переводе дает нам частоты 1,9 МГц, 880 кГц и 33,0 МГц, соответственно.

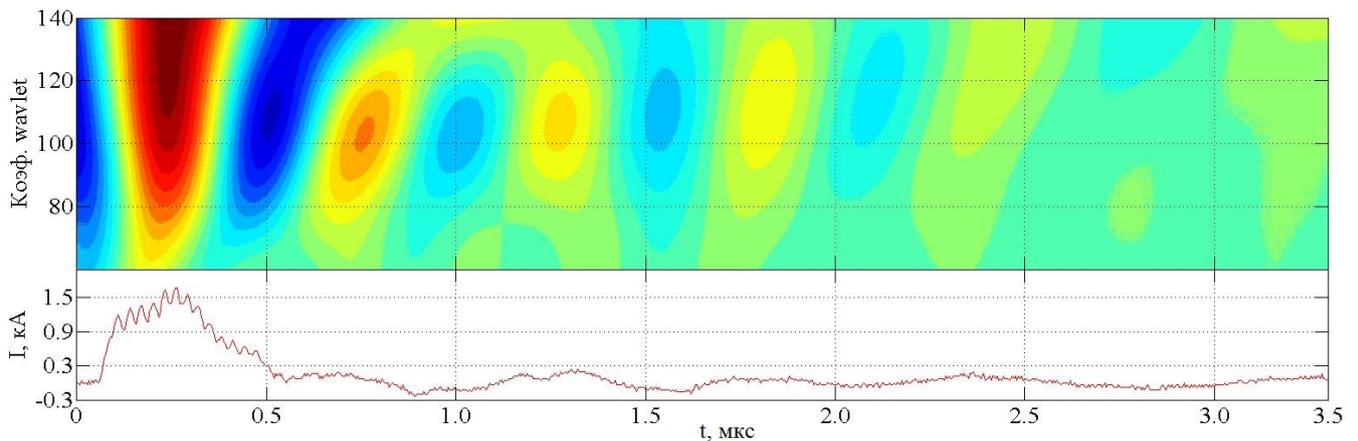


Рисунок 2.16–Вейвлет-преобразование сигнала тока при трёхфазном выключении ШР 6АТ ( $f=1,8$  МГц)

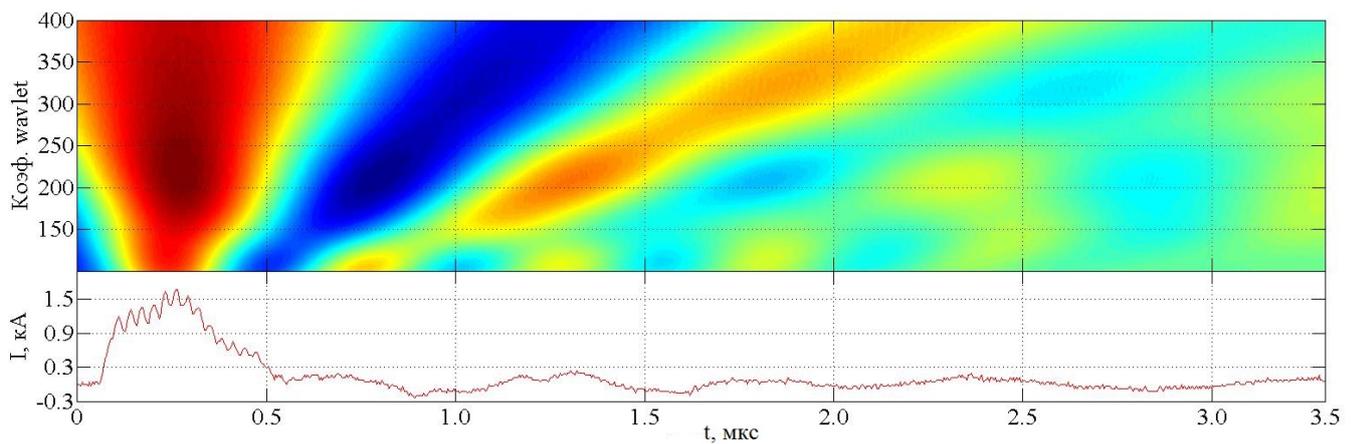


Рисунок 2.17– Вейвлет-преобразование сигнала тока при трёхфазном выключении ШР 6АТ ( $f=880$  кГц)

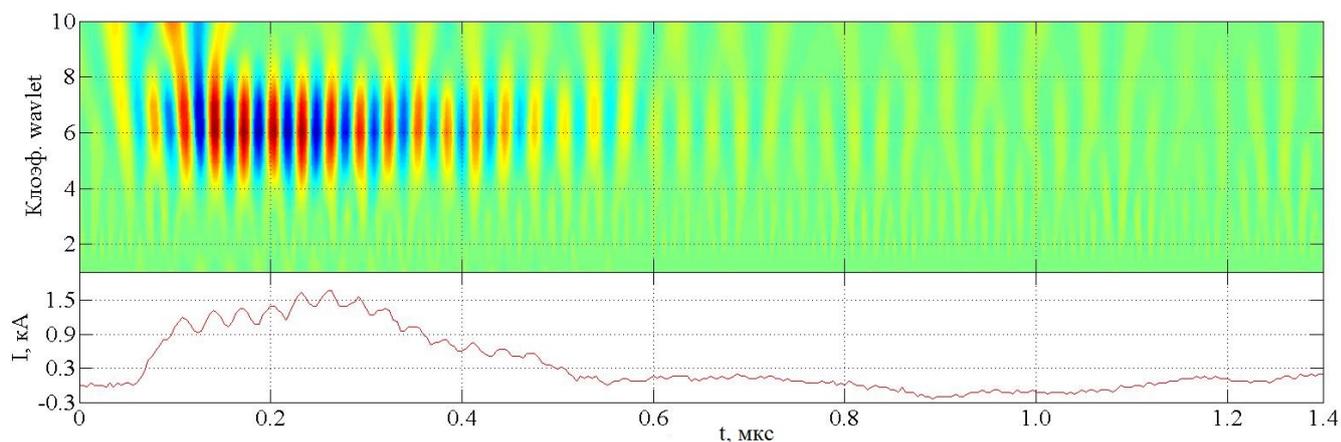


Рисунок 2.18 – Вейвлет-преобразование сигнала тока при трёхфазном выключении ШР 6АТ ( $f=33,0$  МГц)

В результате составляющая частоты 1,8-1,9 МГц содержится как в АЧХ напряжения, так и в АЧХ тока. Данная частота коммутационными процессами в данной ячейке на ПС Итатская не возбуждается. Поэтому можно предположить, что эта частота может быть вызвана резонансными процессами, происходящими внутри трансформатора тока.

Также видно из приведённых данных, кратность перенапряжений была невелика. Однако резкие ступенчатые изменения напряжения на ТТ сопровождались протеканием импульсного тока в цепи заземления нулевой обкладки, амплитуда которого достигала 1200 А. По своей природе – это емкостный ток ( $C \frac{dU}{dt}$ ). Негативные последствия от протекания тока могут быть связаны с увеличением активных потерь в изоляции, термическим и электродинамическим воздействиями на обкладки и контактные соединения.

## 2.4 Экспериментальные исследования переходных и частотных характеристик трансформатора тока IMB550

Для измерения частотных и переходных характеристик ТТ IMB 550 использовалась схема, приведённая на рисунке 2.19. При измерениях частотных характеристик качестве источника синусоидального напряжения использовался генератор ГЗ-112 с внутренним сопротивлением  $R_{вн} = 50$  Ом. Он подключался к выводу P1 первичной обмотки ТТ. При измерении переходных характеристик в

качестве источника напряжения использовался тот же в режиме прямоугольного импульсного напряжения.

В качестве регистратора сигналов, подаваемого с генератора и на выходе ТТ, использовался цифровой четырёхканальный осциллограф (ЦО) типа TDS 220 фирмы «Tektronix». На первый канал подавался сигнал генератора. Второй канал обычно измерял сигнал с токового шунта, в качестве которого использовался резистор с сопротивлением 4 Ом. Он включался в цепь заземления вывода последней ёмкостной обкладки первичной обмотки. На третий канал подавался сигнал с вывода P2 первичной обмотки. Сигналы передавались на входы осциллографа с помощью щупов или коаксиальными радиочастотными кабелями.

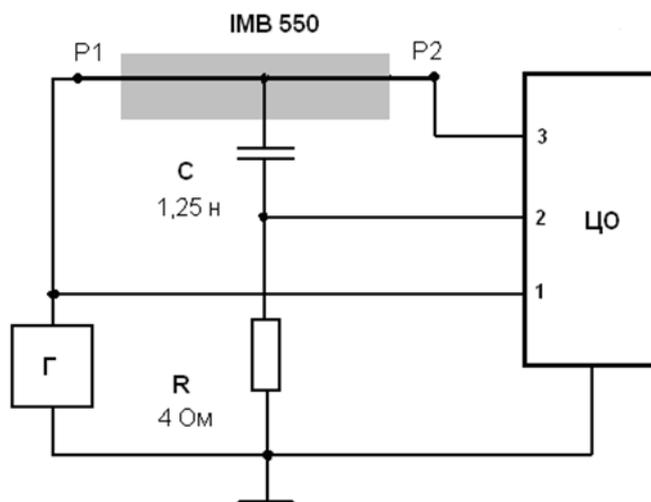


Рисунок 2.19– Схема для измерения частоты и переходных характеристик:

Г – генератор напряжения; ЦО – цифровой осциллограф; R–токовый шунт; P1, P2 – вход и выход первичной обмотки трансформатора тока

Все измерения проводились в две серии. В первой серии сигналы на первичную обмотку подавались с «уровня земли» с помощью медных полос шириной 180 мм и длиной около 4 метров. Несмотря на это индуктивность этих «проводов» заметно влияла на частотные характеристики. Поэтому вторую серию измерений мы провели, расположив аппаратуру на высоте напротив выводов первичной обмотки. Однако заземление бака ТТ пришлось сделать той же медной полосой наверху, чтобы снизить влияние сопротивления обратных проводов. Все выводы вторичных обмоток ТТ заземлялись.

В первом опыте измерения были выполнены с оборудованием, установленным на уровне выводов первичной обмотки. Генератор присоединялся к выводу P1 первичной обмотки. Входной и выходной сигналы снимались с первичной обмотки 1-м и 3-м каналами осциллографа. Сигнал с генератора и вывода P1 обмотки измерялся щупом осциллографа (10 Мом, 20 пФ). На второй канал поступал сигнал с шунта тока (сопротивление 4 Ом). Шунт был включён между баком и заземляющей медной полосой. Точковый сигнал передавался снизу коаксиальным кабелем РК-50 длиной 6 метров, нагруженным на согласующий резистор 47 Ом. Сигнал с выхода первичной обмотки P2 передавался кабелем РК-50 длиной 1 метр, нагруженным на согласующее сопротивление 47 Ом. Все выводы вторичных обмоток ТТ были закорочены, а вывод предпоследней обкладки был соединён с баком.

При измерениях переходной характеристики на обмотку ТТ подавался прямоугольный импульс длительностью более 100 мкс и амплитудой 16,5 В (на холостом ходу). Были выполнены несколько опытов, в которых выход P2 первичной обмотки был нагружен на сопротивления разной величины (47 Ом – рисунок 2.20а и 300 Ом, что, приблизительно, соответствует волновому сопротивлению шин подстанции – на рисунке 2.20,б).

В результате, были определены параметры первичной обмотки:

- ёмкость изоляции – 1250 пФ;
- индуктивность – 4,9 мкГн;
- проходная ёмкость – 36 пФ;
- время распространения сигнала по первичной обмотке – 30 нс.

Обратим внимание на некоторые наблюдаемые на осциллограммах особенности. На осциллограмме сигнала с P1 (канал «1») отчётливо виден первый пик, обусловленный реакцией индуктивности первичной обмотки. Затем, как продолжение той же реакции индуктивности, но уже во взаимодействии с ёмкостью той же обмотки на землю, следует провал и выход на плато с уже менее выраженными колебаниями.

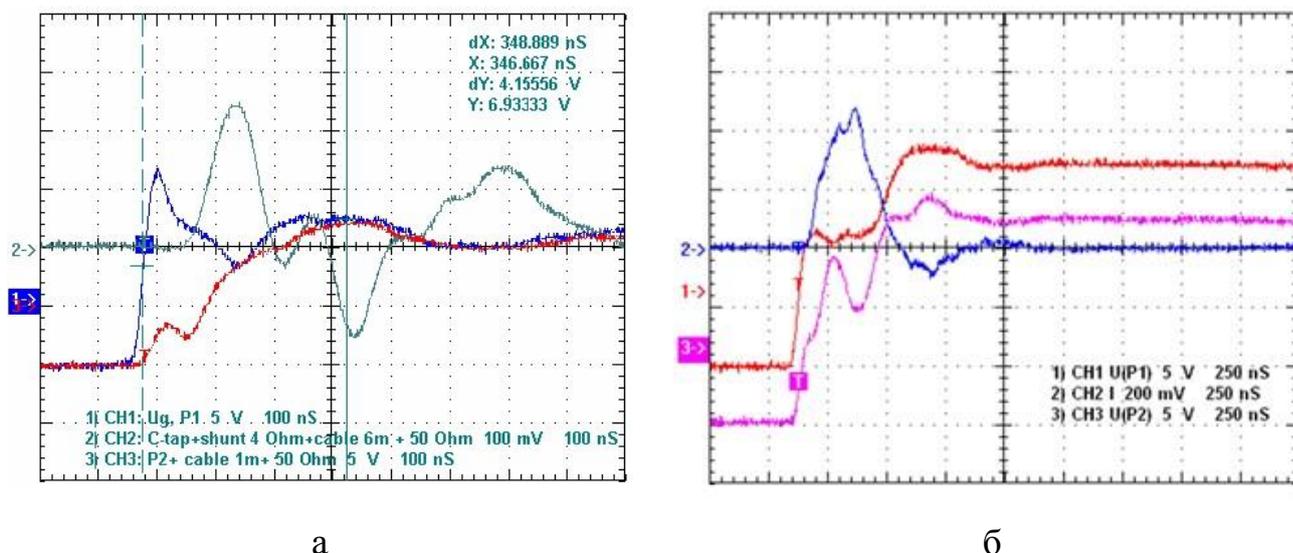


Рисунок 2.20– Реакция трансформатора тока на прямоугольный импульс

Проведем анализ осциллограммы тока (канал «2»), показанный на рисунке 2.20б. На первом этапе применим дискретное преобразование Фурье. Полученная в результате амплитудно-частотная характеристика осциллограммы тока показана на рисунке 2.21. Спектр содержит две составляющие.

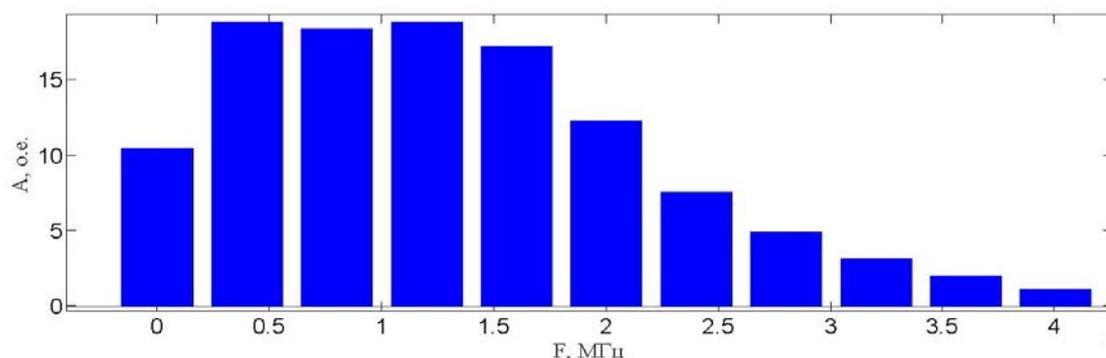


Рисунок 2.21– Спектр тока при воздействии прямоугольного импульса на трансформатор тока

Одна составляющая спектра с частотой в диапазоне от 1.2 до 1.6 МГц. Поскольку шаг спектрального отчета составляет 400 кГц, то получить более точное значение при использовании преобразования Фурье невозможно. Отметим, что данная частота близка к собственной частоте трансформатора тока, полученная при проведении опыта с коммутацией ШР на ПС Итатской. Различие с опытом коммутацией разъединителями можно объяснить наличием

дополнительной индуктивности заземляющей шины в эксперименте с прямоугольным импульсом.

Кроме того, спектр содержит составляющую с частотой около 400 кГц. Однако, поскольку период синусоидального сигнала с такой частотой составляет 2 мкс, а длительность исследуемого сигнала около 1 мкс, то наличие этой составляющей в спектре представляется невозможным. Скорее всего, этот компонент АЧХ образован наложением растекающихся спектров собственно частоты трансформатора тока и постоянной составляющей, присутствующей в спектре любого импульса.

Дополнительно, для проверки этих утверждений, провели вейвлет преобразование (рисунок 2.22).

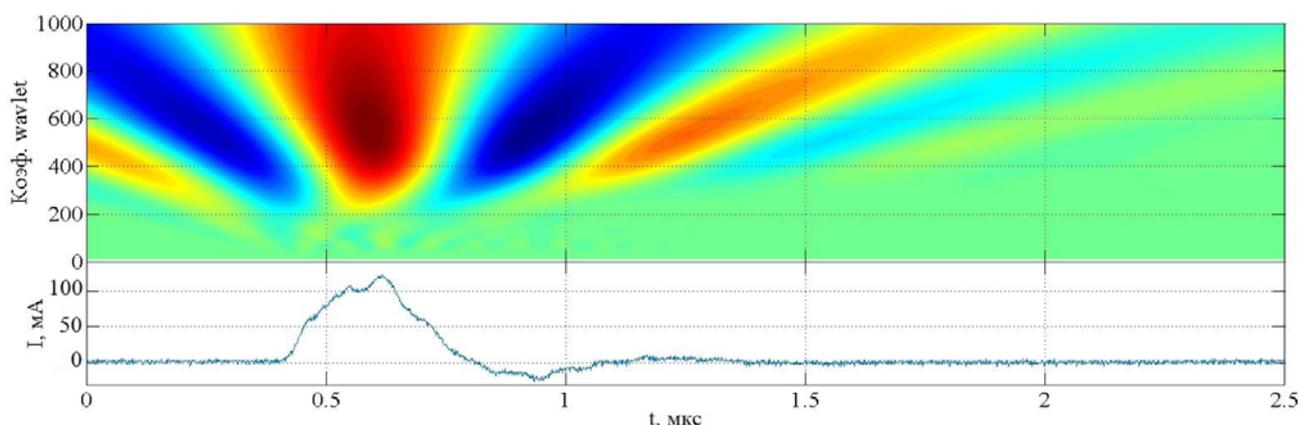


Рисунок 2.22– Вейвлет-преобразование сигнала тока

Максимальная энергия прослеживается при коэффициенте  $a=560$ , что в пересчете дает нам резонансную частоту 1,4 МГц. Из рисунка 2.22 видно, что в спектре сигнала преобладает одна единственная компонента с частотой 1.4 МГц. Никакие другие компоненты, в том числе и составляющая с частотой в 400 кГц, в осциллограмме тока не обнаружены.

Временной сдвиг начала нарастания тока относительно фронта импульса напряжения в 60 нс превышает времени пробега сигнала по кабелю длиной 6 метров (30 нс). По-видимому, дополнительная задержка в 30 нс соответствует времени пробега волны по первичной обмотке ТТ.

На осциллограмме сигнала с P2 (канал «3») виден в начале пичок, обусловленный протеканием тока через проходную ёмкость первичной обмотки, а

затем «медленный» подъём со слабо выраженным колебательным процессом. Примерно через 350 нс кривые напряжения на входе и выходе первичной обмотки полностью совпадают.

Используя полученные осциллограммы и упрощённую эквивалентную схему ТТ в соответствии с рисунком 2.23, оценим проходную ёмкость и индуктивность первичной обмотки. Величина первого импульса тока (20 мА) определяется величиной проходной ёмкости первичной обмотки  $C1$  и производной напряжения. Последнюю можно приблизительно определить (см. луч 1 на осциллограмме) через  $\Delta U/\Delta t = 16,5 \text{ В} / 30 \text{ нс} = 5,5 \cdot 10^8 \text{ В/с}$ . Соответственно  $C1 = I / (\Delta U/\Delta t) \cong 36 \text{ пФ}$ .

Индуктивность первичной обмотки можно приблизительно оценить по величине постоянной времени нарастания тока в обмотке. Общее время нарастания тока составляет (см. луч 3 на осциллограмме) около 300 нс, соответственно  $\tau \cong 100 \text{ нс}$ . Тогда индуктивность  $L = \tau \cdot R = 10^{-7} \cdot 50 = 5 \text{ мкГн}$ .

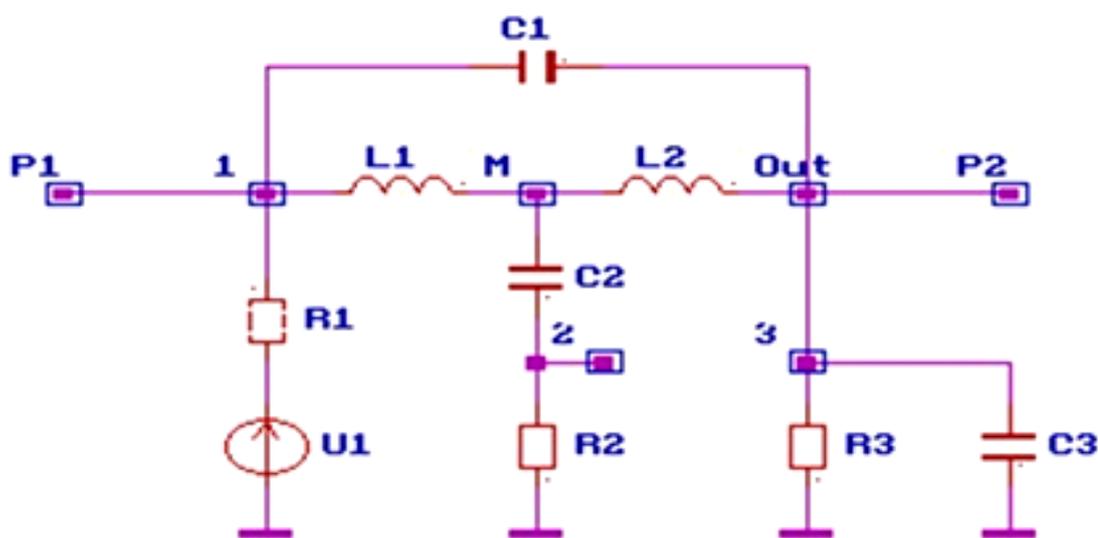


Рисунок 2.23– Упрощенная схема замещения трансформатора тока

Заметим, что в упрощённой схеме замещения индуктивность первичной обмотки искусственно разделена пополам для того, чтобы включить в схему замещения ёмкость первичной обмотки на землю. Расчёты по программе «NL» с заданными в таблице 2.5 параметрами показали хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение с измеренными сигналами (сравните рисунки 2.20а и 2.24).

Таблица 2.5 – Параметры расчётной схемы замещения трансформатора тока

Элементы расчётной схемы замещения ТТ	Обозначение	Величина
Генератор	U1	16,5 В, $\tau_{fr}= 10$ нс
Внутреннее сопротивление генератора	R1	50 Ом
Шунт измерения тока	R2	4 Ом
Измерительный резистор	R3	50 Ом
Ёмкость кабеля и входа осциллографа	C3	20 пФ
Выводы первичной обмотки	P1, P2	–
Проходная ёмкость первичной обмотки	C1	40 пФ
Ёмкость первичной обмотки ТТ на землю	C2	1250 пФ
Индуктивности полуобмоток	L1, L2	2,5 мкГн

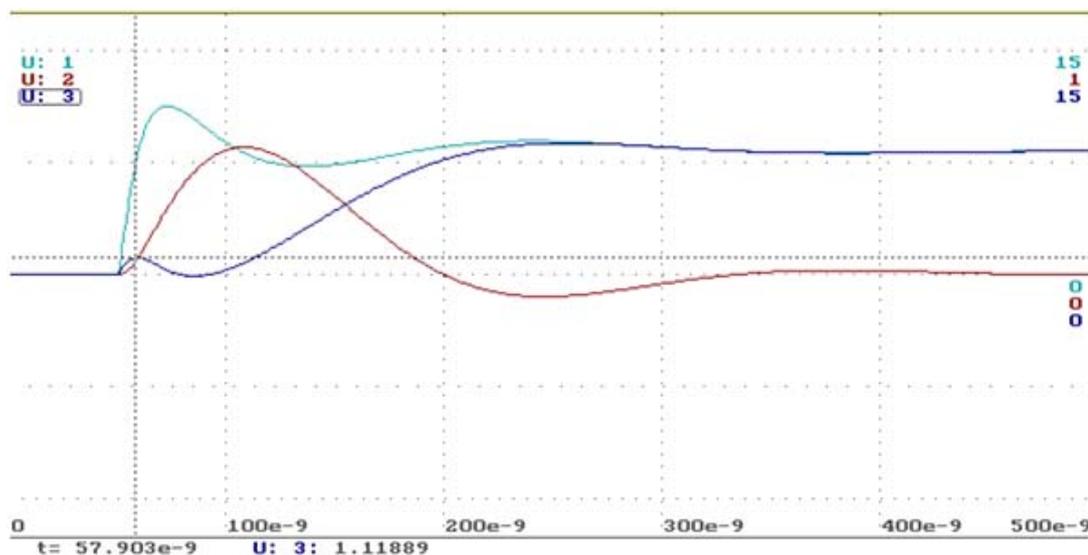


Рисунок 2.24 – Расчётные осциллограммы переходного процесса

Выводы по результатам исследования переходных характеристик:

- индуктивность первичной обмотки ТТ ИМВ 550 из-за большой длины обмотки достаточно велика:  $L \cong 5$  мкГн;
- возникает резонанс напряжения в последовательной цепи: «индуктивность – ёмкость» изоляции первичной обмотки. Это очень опасно для изоляции. Расчётная оценка резонансной частоты даёт величину 2,033 МГц, а оценка этой же частоты из колебаний в кривой тока даёт частоту 1,4 МГц.

Позднее эти же расчёты были проведены в программе МАЭС, разработанной И.Е. Наумкиным [102], и неоднократно использованной им при расчётах сложных переходных процессов в компенсированных линиях электропередачи [103].

Расчёты по программе дали аналогичные результаты и потому здесь не приводятся.

*Амплитудно-частотные характеристики.* При измерениях в той же схеме (рисунок 2.19) сменили режим генератора на синусоидальную форму выходного напряжения. Изменяя частоту в диапазоне (0,2 – 4) МГц, провели измерения напряжений на выходе генератора, ёмкостном выводе и выходном зажиме «P2» ТТ тремя каналами осциллографа. Типичные осциллограммы напряжений приведены на рисунке 2.25.

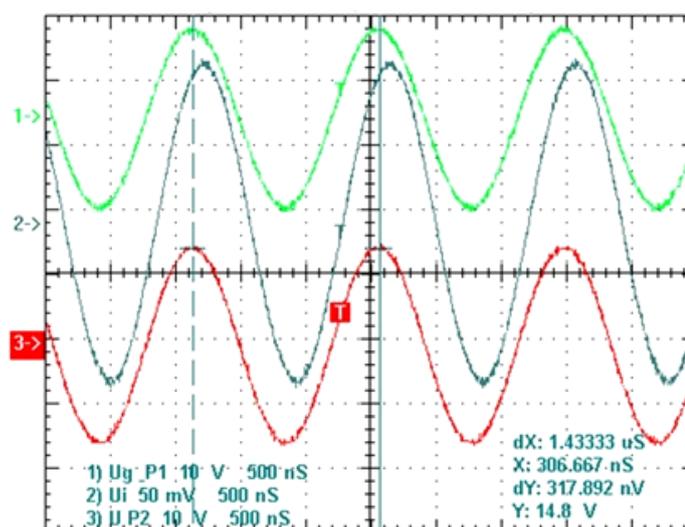


Рисунок 2.25 – Осциллограммы как исходные данные для получения АЧХ

Для каждой частоты определяли сдвиг по фазе  $\Pi$  между напряжением генератора и током, стекающим с вывода последней обкладки, и вычисляли модуль комплексного сопротивления  $Z$ . Например, для показанных на рисунке 2.24 осциллограмм, измеренных на частоте 4 МГц, вычисления дают  $Z = 240$  Ом,  $\Pi = -90^\circ$ , т.е. на этой частоте ТТ ведёт себя как ёмкость с величиной около 166 пФ.

На рисунке 2.26 приведена зависимость модуля входного сопротивления от частоты. Там же приведена теоретическая зависимость. Вычисления были произведены для простейшей цепи, состоящей из последовательно соединённых резистора (4 Ом), ёмкости (1250 пФ) и индуктивности первичной обмотки (5 мкГн). Из эксперимента видно, что фактическая частота резонанса (1,4 МГц)

меньше расчетной частоты резонанса (2 МГц). Это связано с индуктивностью заземляющей шины. Она оказалась приблизительно равной индуктивности первичной обмотки, т.е. 5 мкГн. Поэтому полная индуктивность схемы была около 10 мкГн, что и привело к снижению резонансной частоты до 1.4 МГц.

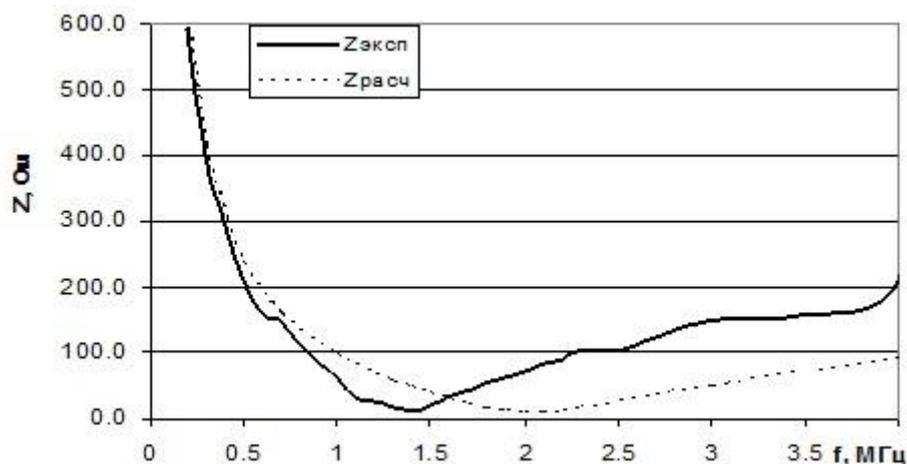


Рисунок 2.26 – Зависимость модуля входного сопротивления первичной обмотки от частоты

## 2.5 Выводы по главе

В результате проведённых испытаний на подстанции «Итатская – 1150 кВ» было выявлено возникновение высокочастотных и относительно слабо затухающих колебаний тока с несколькими резонансными частотами 880 кГц, 1,8 МГц и 33 МГц. Колебания слабо выражены в осциллограмме напряжения, но, отчетливо просматриваются в осциллограммах тока. Можно предположить, что эти колебания могут быть связаны с возбуждением резонанса напряжений внутри самого трансформатора тока. Дело в том, что общая длина первичной обмотки составляет почти 10 метров и, соответственно может обладать заметной индуктивностью. Во взаимодействии с ёмкостью обмотки при воздействии напряжения с крутым фронтом внутри обмотки действительно могут возникнуть резонансные процессы.

При этом резонанс напряжения, наличие которого прослеживается и в амплитудно-частотной характеристике, может проявлять себя именно так, что

колебаний в общем напряжении на ТТ в явном виде не прослеживаются, но они есть внутри обмотки, например, в центре. Из общих представлений о резонансе напряжения следует вывод о том, что эти напряжения могут превышать внешнее напряжение и вызывать ускоренное старение изоляции ТТ. В пределе они могут быть сопоставимы с электрической прочностью изоляции.

Поэтому необходимо исследовать процессы в ТТ ИМВ 550 в области высоких частот и составить полную схему замещения его первичной обмотки, отражающую суть внутренних переходных процессов и адекватно описывающих распределение напряжения по слоям изоляции и по длине обкладок.

## ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ВНУТРИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

В настоящей главе представлены результаты математического и физического моделирования трансформатора тока ИМВ-550. Основные результаты опубликованы в работах [113-115, 117-119]

### 3.1 Разработка математической модели первичной обмотки трансформатора тока ИМВ 550

В предыдущем параграфе было показано, как на основе измеренных экспериментально основных параметров первичной обмотки синтезируется простейшая эквивалентная схема замещения ТТ, которую можно вставлять во внешнюю цепь для исследования переходных процессов. По результатам опытов стало очевидным наличие резонансов токов и напряжений. Понятно, что при резонансе напряжений какие-то участки изоляции или её слои в целом, могут подвергаться перенапряжениям. Однако сказать, где локализуются эти резонансные повышения напряжения в простейшей эквивалентной схеме невозможно. Поэтому для моделирования нужно было синтезировать эквивалентную схему с распределёнными параметрами. Отправной точкой для синтеза служили геометрические размеры первичной обмотки ТТ ИМВ 550 длиной около 10 метров (рисунок 3.1).

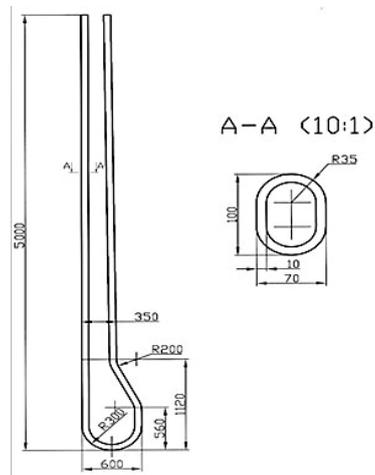


Рисунок 3.1 – Эскиз витка первичной обмотки трансформатора тока ИМВ 550

Первичная обмотка трансформатора тока ИМВ 550 состоит из одного витка U-образной формы с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа, в которой требуемое распределение напряжения по толщине и по длине обмотки осуществляется при помощи металлических обкладок, закладываемых в изоляцию в процессе её намотки, аналогично тому, как это делается в конструкциях вводов высокого напряжения. Её математическую модель с изоляцией и выравнивающими обкладками можно представить в двух видах:

Во-первых, был велик соблазн представить модель обмотки с изоляцией и обкладками в виде набора коаксиальных линий с распределёнными параметрами, имитирующих каждый отдельно взятый изоляционный слой. При этом внутренним проводником первой линии был бы сам виток обмотки, а оболочкой служила бы первая обкладка. Во второй линии роль внутреннего проводника играла бы первая обкладка, а оболочкой была бы вторая обкладка и т.д. Понятно, что каждая линия имела бы свою «электрическую» длину и своё волновое сопротивление, а в целом схема напоминала бы конструкцию импульсного коаксиального трансформатора. Принцип его работы основан на плавно изменяющемся сечении внутреннего электрода. Волновые сопротивления на входе и выходе такого трансформатора согласованы выбором соотношения диаметров электродов, дискретно изменяющимися в одну сторону. Входной узел трансформатора предназначен для подключения к источнику трансформируемого сигнала, а выходной узел – к нагрузке. Подобные конструкции используют для повышения амплитуды высоковольтных импульсов наносекундных длительностей. Именно это обстоятельство и заставило автора отказаться от данного подхода к моделированию, поскольку характерные длительности переходных процессов относятся к диапазону от микросекунд до миллисекунд.

В итоге был принят второй вариант моделирования в обмотки ТТ в виде последовательных и параллельных цепочек сосредоточенных ёмкостей и индуктивностей. К сожалению, количество слоёв изоляции, а также количество и длина обкладок нам неизвестны, поэтому произвол при выборе шага разбиения изоляции на слои был неизбежен. В итоге при составлении схемы замещения

первичной обмотки ТТ её разбили на 11 частей, две части из которых по 0,5 метров оставили без изоляции без бумажной изоляции и остальные части по 1 метру длиной каждая были с бумажной изоляцией и обкладками. Исходя из наиболее вероятной рабочей напряжённости электрического поля в 4 кВ/мм, приняли, что изоляция состоит из 5 слоёв изоляционной бумаги толщиной 20 мм каждый (рисунок 3.2).

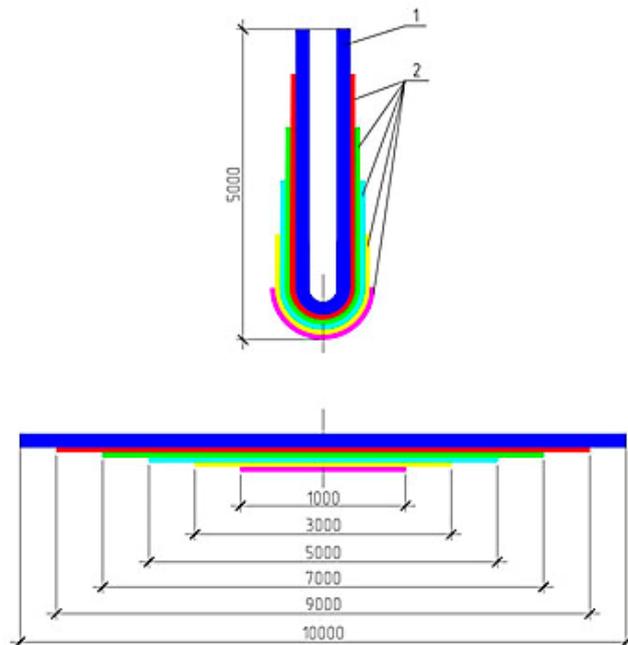


Рисунок 3.2 – Принятое в модели строение первичной обмотки трансформатора тока ИМВ 550 в схеме замещения: 1 – стержень токоведущий; 2 – слои бумажно-масляной изоляции с обкладками

Значения индуктивностей и ёмкостей в ячейках, получили исходя из предположения о равномерном распределении общей индуктивности и ёмкости слоёв по длине витка и соответствующей обкладки. Значения индуктивностей получили равными  $L1 = 0,2$  мкГн и  $L2 = 0,5$  мкГн, где  $L1$  и  $L2$  индуктивности частей витка первичной обмотки без изоляции и с изоляцией. Суммарное значение индуктивности первичной обмотки ТТ составило  $L_{\Sigma} = 4,9$  мкГн, что в точности соответствует экспериментально полученному значению.

Значение ёмкости слоя изоляции было получено равным  $C = 1,55$  нФ. Суммарное значение ёмкости изоляции -  $C_{\Sigma} = 1358$  пФ, что не сильно отличается от полученного ранее опытного значения (1250 пФ).

Индуктивность конденсаторных обкладок, по которым в области высоких частот через ёмкости изоляции будут протекать токи, получили равными  $L3 = 0,63$  мкГн. Понятно, что данные индуктивности проявляются только на высоких частотах, а на промышленной частоте их можно было бы не учитывать.

Составленная таким образом схема замещения приведена на рисунке 3.3.

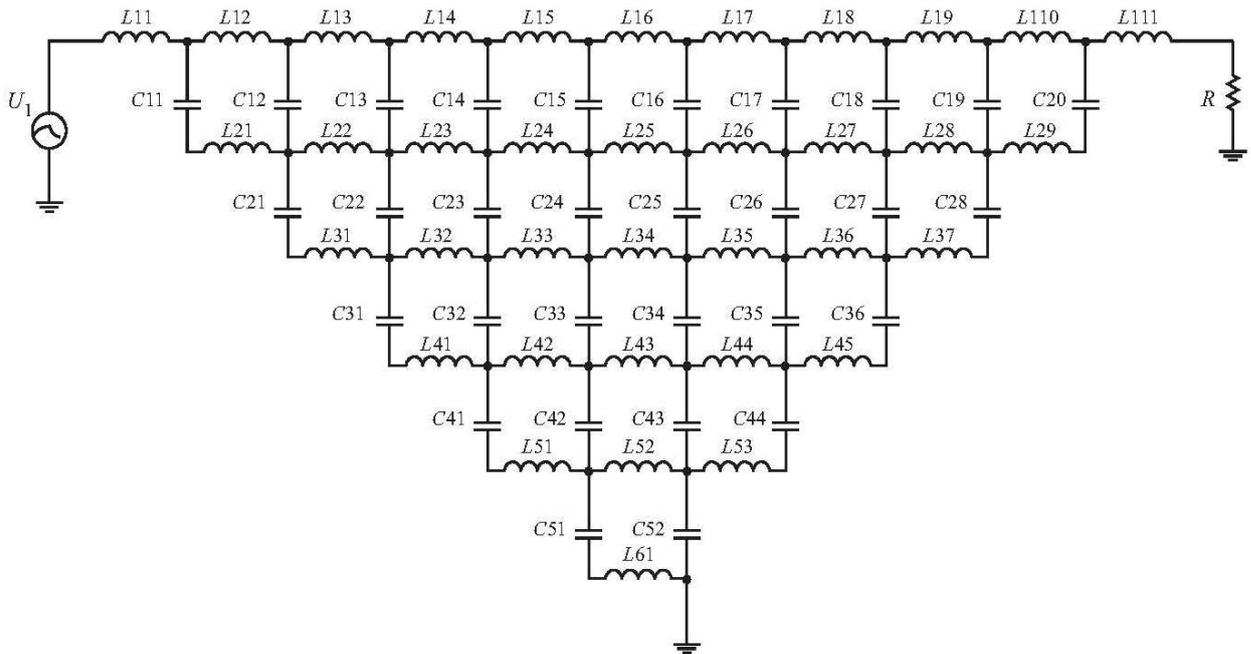


Рисунок 3.3 – Расчётная схема замещения трансформатора тока ИМВ 550

В ней индуктивности  $L11$  и  $L19$  моделируют обмотку на выходе из трансформатора тока без изоляции, индуктивности  $L11 - L19$ ,  $L21 - L27$ ,  $L31 - L35$ ,  $L41 - L44$ ,  $L51$  – металлические обкладки. Индуктивность  $L10$  – медная полоса заземлителя. Ёмкости  $C11 - C18$ ,  $C21 - C26$ ,  $C31 - C34$ ,  $C41 - C42$  моделируют каждый слой изоляции. Схема также содержит сопротивление  $R$  и ёмкость  $C$ , которые моделируют ошиновку, к которой подключён трансформатор тока. С помощью источника  $V1$  моделируется ступенчатое напряжение, которое подаётся на внешние зажимы обмотки ТТ.

Расчёт напряжений на изоляции вёлся в схеме, приведённой на рисунке 3.3, в прикладном пакете Pspice. На схему подавался прямоугольный импульс напряжения бесконечной длительности с амплитудой  $U_{\text{фм}} = 428,66$  кВ и

длительностью фронта 0,5 мкс. Расчётные осциллограммы приведены на рисунке 3.4.

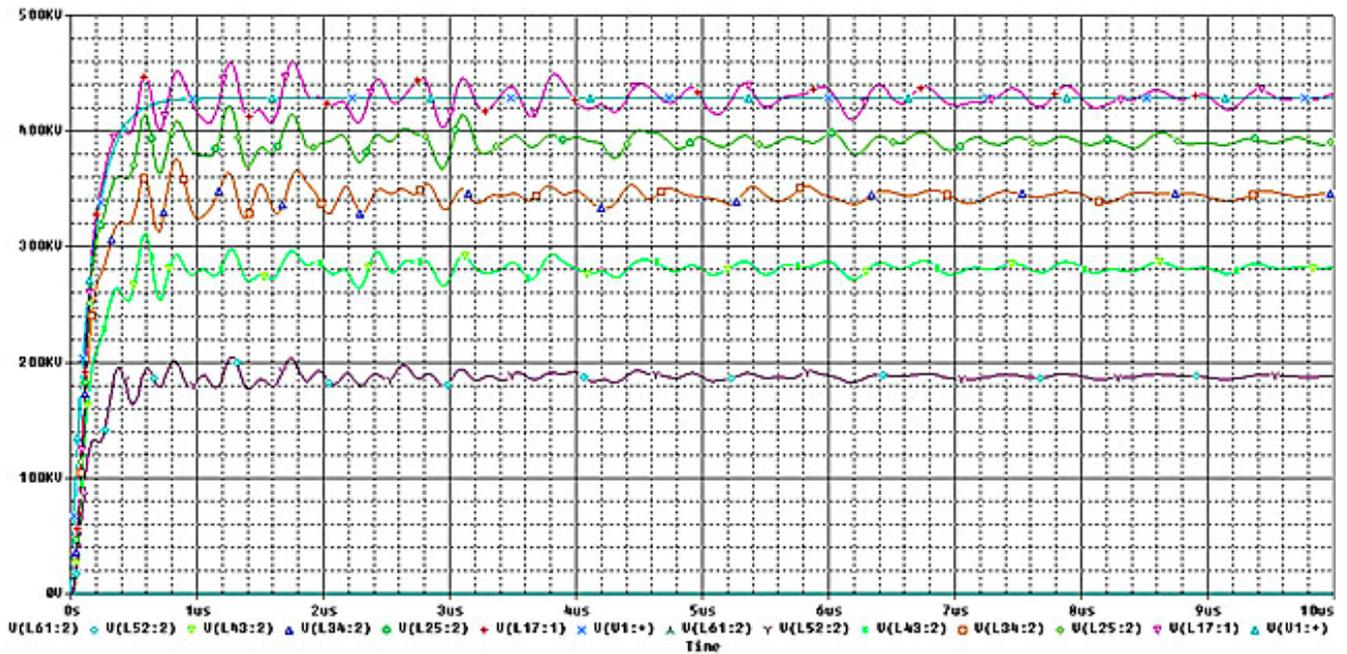


Рисунок 3.4 – Осциллограмма переходных процессов при  $\tau_{\phi} = 0,5$  мкс

Из них видно, что при воздействии на первичную обмотку прямоугольного импульса в ней возникает резонанс напряжений на частоте около 2 МГц, с наибольшей амплитудой 460,8 кВ в середине обмотки, что соответствует кратности перенапряжения  $K = 1,1 U_{\text{фм}}$ . Ближе к нулевой обкладке, амплитуда напряжения уменьшается до 204,5 кВ.

Для получения зависимости перенапряжений от длительности фронта были проведены соответствующие расчёты. По их результатам было установлено, что наибольшие амплитуды наблюдались при крутых фронтах импульса:  $U_{\text{фм}} = 494,11$  кВ ( $K = 1,18$ ) и  $U_{\text{фм}} = 481,62$  кВ ( $K = 1,15$ ), соответственно при  $\tau_{\phi} = 0,2$  мкс и  $\tau_{\phi} = 0,3$  мкс. При сглаживании фронта импульса, амплитуда резонансных увеличений напряжения уменьшалась.

### 3.2 Физическое моделирование переходных процессов в макете первичной обмотки

Для верификации разработанной математической модели было решено изготовить макет обмотки ТТ ИМВ-550 (физическую модель) реальных размеров.

Каркас витка первичной обмотки был изготовлен из деревянных брусков (рисунок 3.5а). В качестве материала для моделирования витка и обкладок использовалась полосовая медная лента толщиной 0,1 мм, намотанная внахлест (рисунок 3.5б).



а



б



в

Рисунок 3.5 – Этапы изготовления макета: а – каркас макета витка; б – макет витка; в – готовый макет обмотки со слоями изоляции и отводами от обкладок

Изоляция выполнялась из поливинилхлоридной ленты разного цвета для каждого слоя. Толщина каждого слоя составляла 1 мм. В результате получился макет витка первичной обмотки с наложенными на него четырьмя слоями изоляции и проводящими обкладками (рисунок 3.5в). Для исследования распределения напряжения по длине обмотки и обкладкам, были сделаны выводы в девяти точках с каждого слоя. Параметры модели были получены следующие: ёмкость изоляции – 8,3 нФ; индуктивность – 5,3 мкГн.

Заметим, что в реальной конструкции число слоёв изоляции и уравнивающих обкладок значительно больше, чем в физической модели. Кроме того, на краях обкладок в изоляции размещаются так называемые манжетки, предназначенные для выравнивания продольного электрического поля между краями обкладок. Но для поставленной нами цели вполне годился и упрощённый макет обмотки.

Суммарное значение индуктивности первичной обмотки ТТ совпало с измеренным значением, что и следовало ожидать, так как индуктивность главным образом зависит от длины проводника. Значение ёмкости изоляции заметно отличалось от реального значения, что объяснялось меньшей толщиной слоя и применением в качестве изоляции ленты ПВХ, которая имеет большую диэлектрическую проницаемость, чем бумага, пропитанная маслом, которая используется в реальном трансформаторе. Несмотря на данные различия физической модели от реального ТТ, для получения качественных характеристик распределения напряжения вдоль обмотки и по слоям, данные отклонения не были принципиальными.

В качестве источника синусоидального и импульсного напряжения использовался универсальный генератор ГЗ-112/1 с внутренним сопротивлением 50 Ом. Генератор присоединялся к выводу первичной обмотки. Для измерений использовался цифровой 4-х канальный осциллограф Tektronix TDS 2024 В. Входной и выходной сигналы снимались с первичной обмотки 1-м и 2-м каналами. В качестве заземлителя использовалась медная полоса шириной 300 мм и длиной около 5 метров (рисунок 3.6). Шунт для измерения тока  $R_{\text{шн}}=0,507$  Ом был включён между последней обкладкой и заземляющей медной полосой (рисунок 3.7).

В первом эксперименте получили резонансную частоту 1 МГц. Модуль входного сопротивления на резонансной частоте составил 13,7 Ом. За вычетом сопротивления токового шунта собственное сопротивление составило 13,2 Ом. Совершенно очевидно, что это значение значительно больше сопротивления витка на постоянном токе из-за влияния скин-эффекта. Для кабеля с оплёткой

$$R_f = R_{\text{=}} \frac{\sqrt{f}}{d}, \quad (3.1)$$

где  $f$  – частота, а  $d$  – диаметр оплётки. Чтобы удостовериться в сказанном были проведены измерения, которые дали величину погонного сопротивления на постоянном токе  $R_{\text{=}} = 0,167$  мОм. Расчёт по (3.1) дал величину  $R_f = 13,7$  Ом, т.е. весьма близкую к экспериментальному значению.



Рисунок 3.6 – Общий вид макета, полосы заземления и генератора



Рисунок 3.7 – Регистрация сигналов в центральной части витка и обкладок

Сняли распределение напряжение по обмотке и обкладкам на резонансной частоте. Результаты измерений приведены на рисунке 3.8.

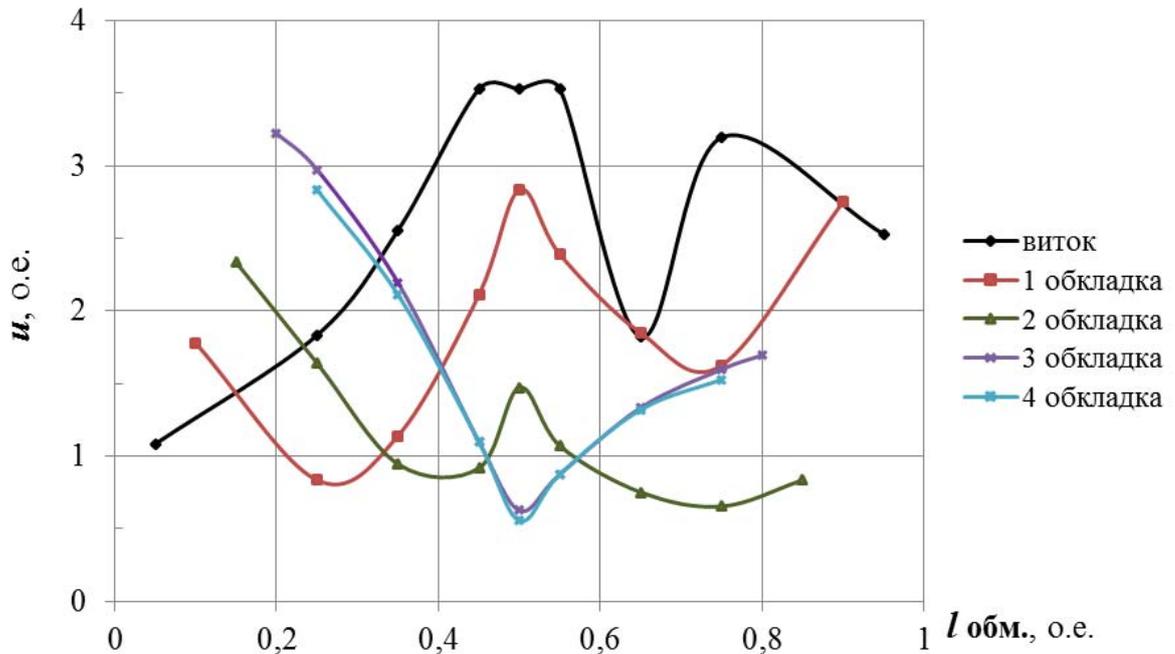


Рисунок 3.8 – Распределение напряжения по длинам витка и обкладок

Нетрудно заметить, что распределение напряжения по длине 3-й и 4-й обкладки практически совпадает, чего не должно быть. Проверив макет, было обнаружено, что 3-я и 4-я обкладки оказались случайно закорочены между собой в одной точке.

Несмотря на этот дефект модели эксперимент был признан весьма полезным, во-первых, данный эффект имитирует случай пробоя слоя изоляции и закорачивания науглероженным каналом пробоя двух обкладок в одной точке. Во-вторых, он показал значительное резонансное увеличение напряжения внутри макета ТТ в таком случае. Напомним, что по существующим нормам допускается увеличение ёмкости изоляции на 2,5 – 5 %, что вызывается пробоем одного-двух слоёв изоляции. Действительно, слоёв изоляции всегда более десяти и пробой одного слоя считается можно начальным повреждением. Однако полученный нами результат говорит о том, что данный вывод справедлив, если аппарат не подвергается коммутационным перенапряжения высокой частоты. Если таковые имеют место, то надо учитывать, что возбуждение внутреннего резонанса напряжения внешними перенапряжениями высокой частоты может привести к

повышению напряжения на некоторых слоях изоляции в несколько раз и к пробоем следующего слоя изоляции, а, в конечном счёте, к отказу ТТ.

Устранив неисправность, провели второй эксперимент с измерением частотной зависимости модуля входного сопротивления. На рисунке 3.9 приведены обе зависимости, полученные в первом и втором экспериментах. Частота резонанса в опыте № 2 увеличилась до 1,6 МГц, а модуль сопротивления снизился до 3,6 Ом.

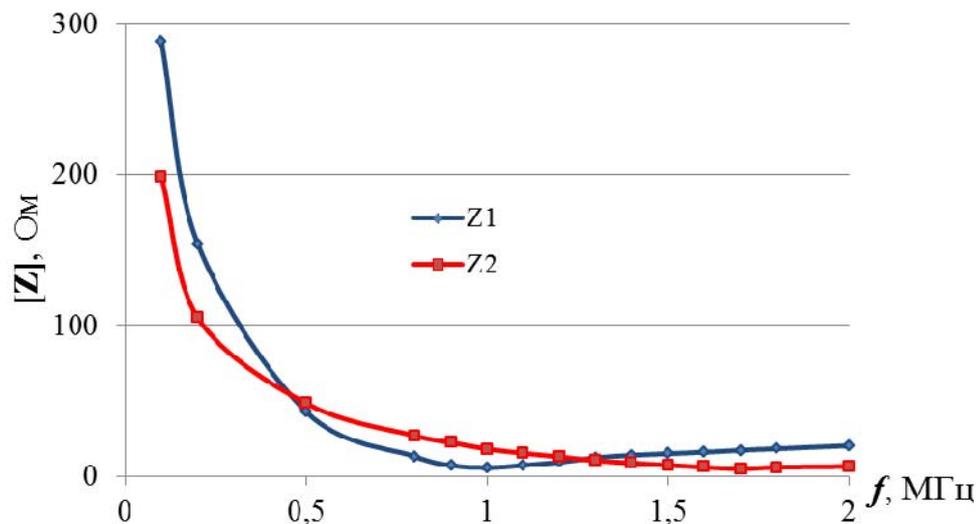


Рисунок 3.9 – Зависимость модуля входного сопротивления первичной обмотки от частоты в первом ( $Z_1$ ) и втором ( $Z_2$ ) опытах

При измерениях переходной характеристики на обмотку ТТ подавался прямоугольный импульс. Осциллограммы переходных процессов при нагружении первичной обмотки на сопротивление 18 Ом и ёмкость 390 пФ приведены на рисунке 3.10.

Видно, что на частоте 1 МГц распределение напряжения по слоям достаточно равномерное. Средние значения напряжения на первом, втором и третьем слоях изоляции составили 27, 23 и 22 % от величины входного напряжения. На частоте 2 МГц неравномерность распределения оказалась существенно большей: 71, 33 и 21 %. Обратим внимание, что сумма падений напряжения не равна 100 % из-за падения напряжения на первом участке витка, не закрытой изоляцией и из-за резонансного повышения напряжения в центральной части обмотки.

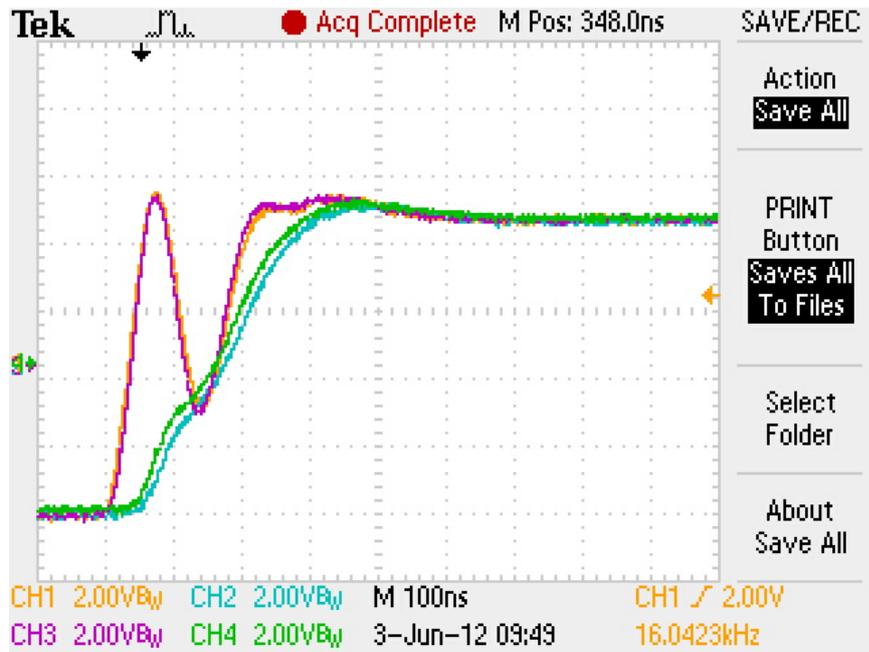


Рисунок 3.10 – Осциллограммы напряжения на выходе генератора (1 луч), в начале (3), середине (4) и в конце (2) витка

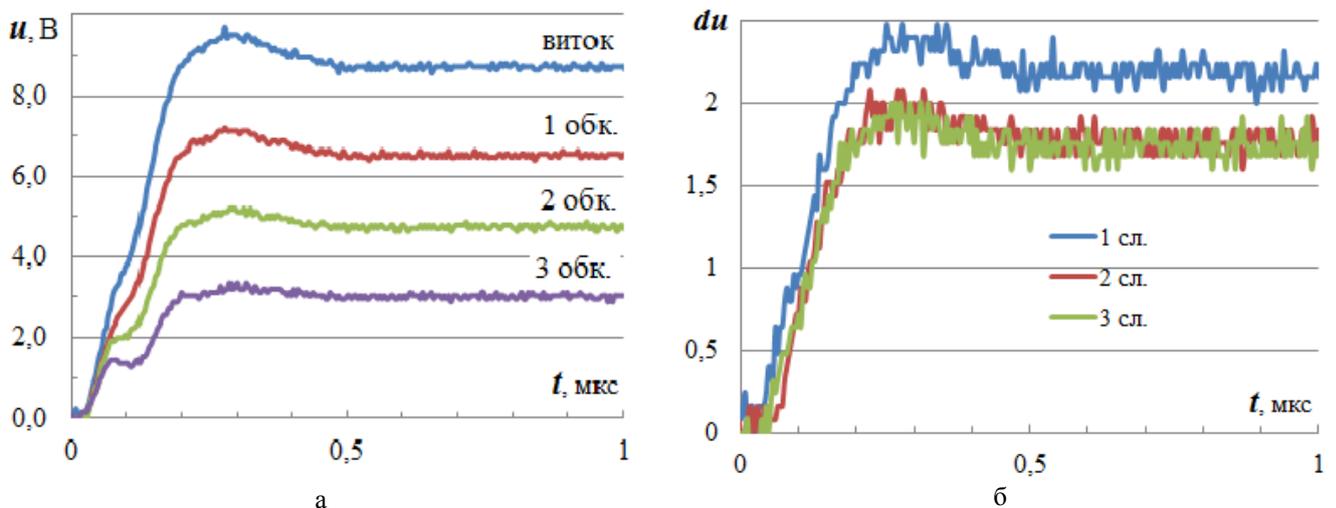
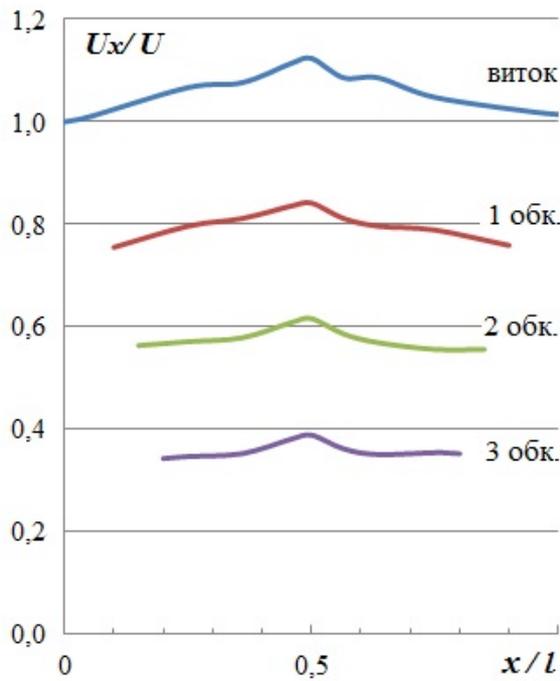
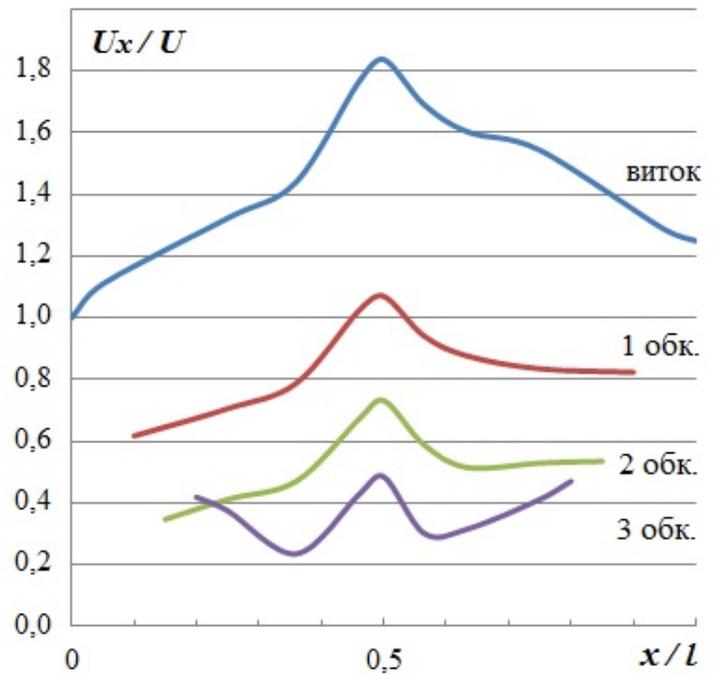


Рисунок 3.11 – Потенциалы на витке и обкладках (а) и напряжения на слоях изоляции (б) в середине первичной обмотки

Ещё более заметен этот эффект при измерениях на частотах 1 и 2 МГц. Из приведённых на рисунках 3.12 и 3.13 данных видно, что на первом слое изоляции, прилегающем к токопроводящему стержню, напряжение на частоте 2 МГц почти в два раза больше, чем на втором и третьем слоях, а на частоте 1 МГц превышение напряжения на первом слое изоляции составило 20 %. На частоте 50 Гц напряжение делилось практически поровну.

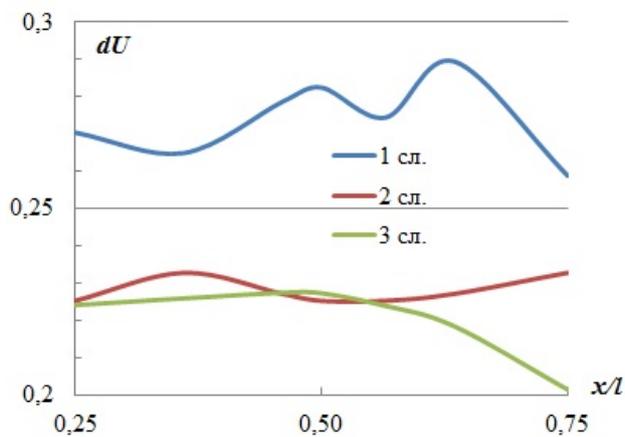


а

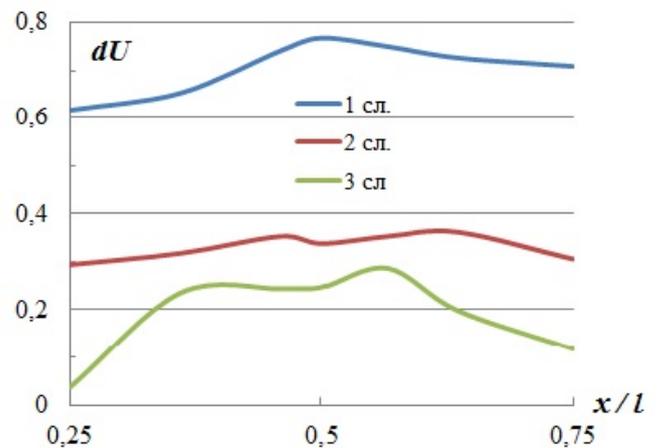


б

Рисунок 3.12 – Распределение потенциалов вдоль витка и обкладок при синусоидальном напряжении частоты 1 МГц (а) и 2 МГц (б) на входе обмотки



а



б

Рисунок 3.13 – Распределение потенциалов вдоль слоёв изоляции при синусоидальном напряжении частоты 1 МГц (а) и 2 МГц (б) на входе обмотки

### 3.3 Математическое моделирование частотных и переходных характеристик первичной обмотки трансформатора тока ИМВ 550

Ранее разработанная математическая модель для реального трансформатора тока ИМВ 550 (рисунок 3.3), была скорректирована, исходя из параметров физической модели. Главное отличие состояло в значении ёмкости изоляции, 1250 пФ реального трансформатора и 8,3 нФ физической модели, что связано с различным материалом изоляции.

Составленная таким образом схема замещения физической модели приведена на рисунке 3.14.

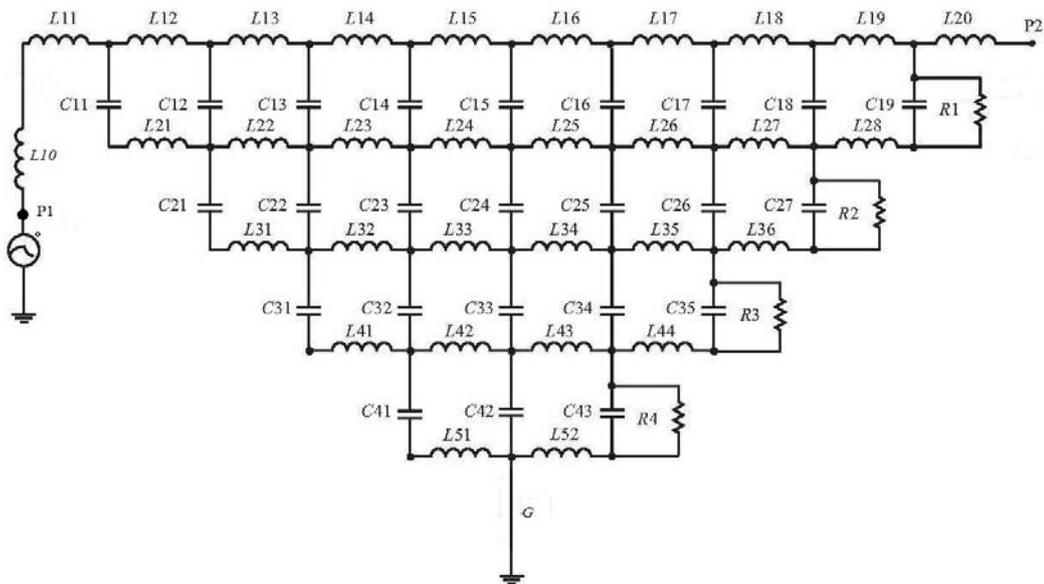


Рисунок 3.14 – Расчётная схема замещения физической модели трансформатора тока ИМВ 550

В ней индуктивности  $L11 - L20$  моделировали погонные индуктивности первичной обмотки, причём  $L11$  и  $L20$  относились к начальной и конечной части витка, которые не имеют уравнивающих обкладок и, соответственно, ёмкостей относительно обкладок. Индуктивности  $L21 - L27$ ,  $L31 - L35$ ,  $L41 - L44$  и  $L51$  моделировали индуктивные свойства уравнивающих обкладок, которые проявляются более только на высоких частотах, а на промышленной частоте их можно было бы не учитывать. Индуктивность  $L10$  моделировала внешние присоединения к физической модели обмотки ТТ. Ёмкости  $C11 - C18$ ,  $C21 - C26$ ,

С31 – С34, С41 – С42 моделировали части слоёв изоляции. С помощью источника V1 моделировалась «ступенька» напряжения, которая формируется на входе обмотки реального ТТ в процессе коммутации разъединителя.

Осциллограммы напряжений на слоях в середине обмотке, полученные в расчёте по математической модели макета, приведены на рисунке 3.15.

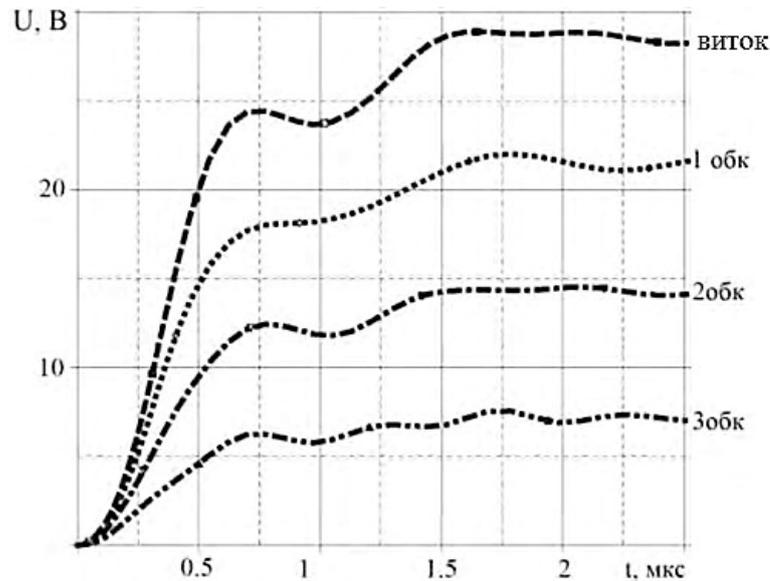


Рисунок 3.15 – Осциллограмма распределения напряжения по слоям в середине обмотки при нагрузке на шинах  $C=390$  пФ,  $R=18$  Ом

Как мы видим, расчёты по программе P-Spice с заданными параметрами показали хорошее качественное и количественное совпадение с измеренными сигналами на макете ТТ ИМВ 550 (рисунок 3.11). Распределение напряжения по слоям обмотки трансформатора тока было достаточно равномерным при заданных условиях эксперимента. Следовательно, данной математической моделью можно пользоваться для дальнейших исследований переходных процессов, происходящих внутри ТТ ИМВ 550. Далее было проверено влияние длительности фронта на перенапряжения.

На исследуемую схему подавался прямоугольный импульс бесконечной длительности с различными фронтами и различной нагрузкой на конце исследуемой схемы. Одна из расчётных осциллограмм приведена на рисунке 3.16.

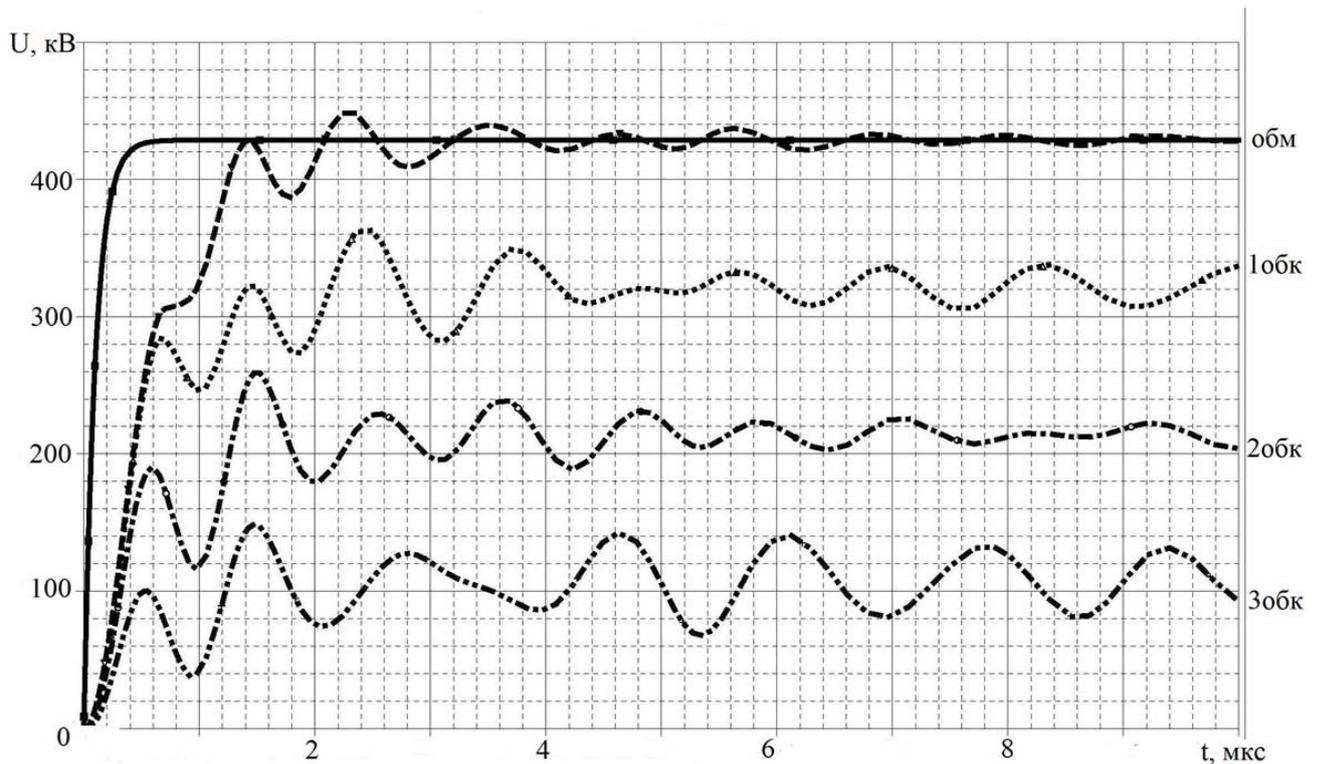


Рисунок 3.16 – Осциллограмма переходных процессов обмотки при нагрузке на шинах  $C=390$  пФ,  $R=18$  Ом

По результатам опытов с физической и математической моделью стало очевидно наличие резонанса напряжений, но при этом существенного повышения напряжения мы не наблюдали, что противоречило начальным предположениям. Возникла убежденность в том, что в схеме нужно более строго учитывать параметры внешних присоединений.

### 3.4 Моделирование переходных процессов в схемах замещения открытого распределительного устройства 500 кВ подстанции «Итатская 1150 кВ»

После опытов с физической и математической моделями, было решено рассмотреть работу трансформатора тока ИМВ 550 в реальных условиях на ПС Итатская. Реальная электрическая схема ПС Итатская 1150 кВ приведена в Приложении Б. Чтобы выявить наиболее тяжёлый режим работы ТТ, были рассмотрены варианты работы его работы в различных ячейках ОРУ 500 кВ.

Также была выявлена необходимость учёта индуктивности подножника  $L_{\Pi} \approx 5$  мкГн, на котором монтируется ТТ.

По результатам численных экспериментов на примере ОРУ 500 кВ подстанции «Итатская-1150 кВ», было установлено, что режим коммутации линейного разъединителя ШР-521, является наиболее тяжёлым для ТТ (рисунок 3.17).

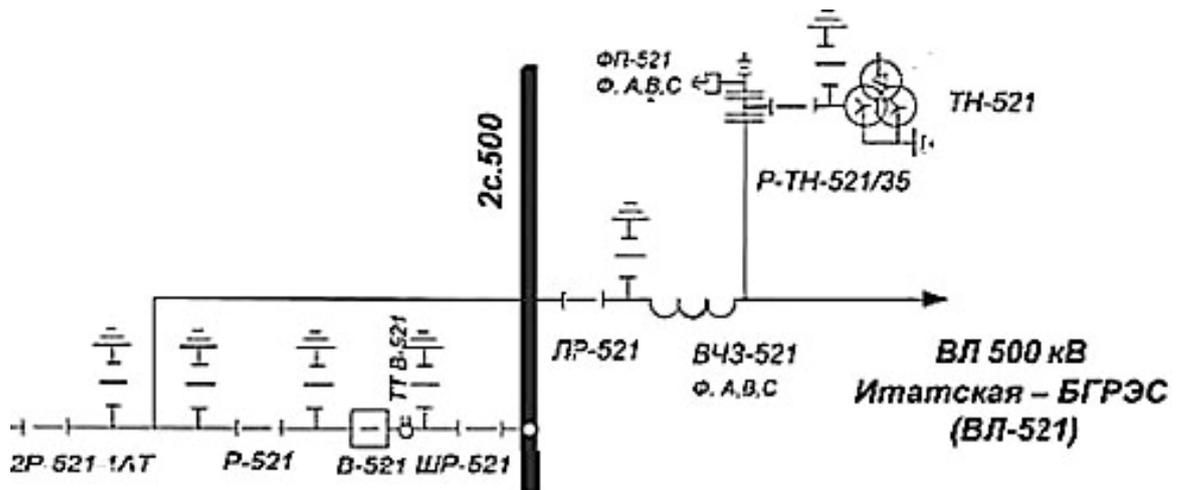


Рисунок 3.17 – Схема ячейки воздушной линии ВЛ-521 на открытом распределительном устройстве 500 кВ подстанции «Итатская - 1150 кВ»

Схема замещения для этого случая, приведена на рисунке 3.18.

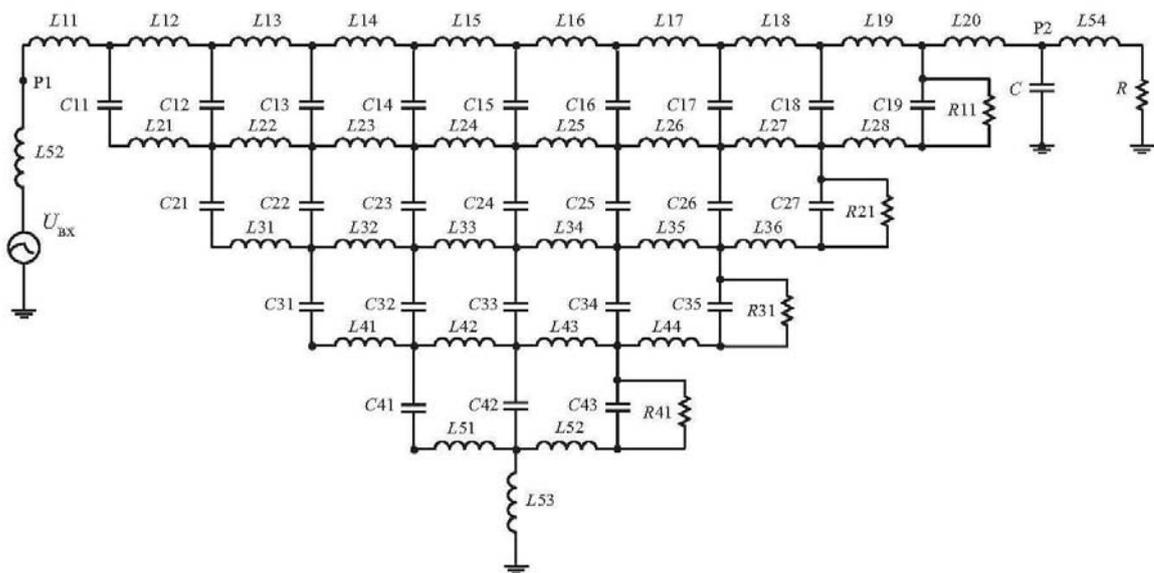


Рисунок 3.18 – Расчётная схема замещения трансформатора тока ИМВ 550 для режима коммутации линейного разъединителя

При её синтезе считалось, что выключатель -521 находится в отключённом состоянии, поэтому он моделировался ёмкостью шунтирующих его разрывы конденсаторов,  $C = 1,4$  нФ. Участок шин между разъединителем и входным зажимом P1 ТТ длиной 7 м моделировался индуктивностью  $L52 = 7$  мкГн. Между выходным зажимом P2 ТТ В-521 и линейным присоединением ВЛ-521 находится холостой отрезок шин около 70 м. Этот участок в схеме заменили индуктивностью  $L54 = 70$  мкГн. Линию ВЛ-521 моделировали волновым сопротивлением  $Z=335$  Ом, что соответствует значению для ВЛ 500кВ.

Результаты расчёта напряжений на обмотке и обкладках в середине обмотки приведены на рисунке 3.19 для случая, когда на вход ТТ подаётся прямоугольный импульс напряжения большой длительности с амплитудой  $U_{вх.макс.} = U_{н.р.макс.} = 428,7$  кВ и длительностью фронта 0,1 мкс.

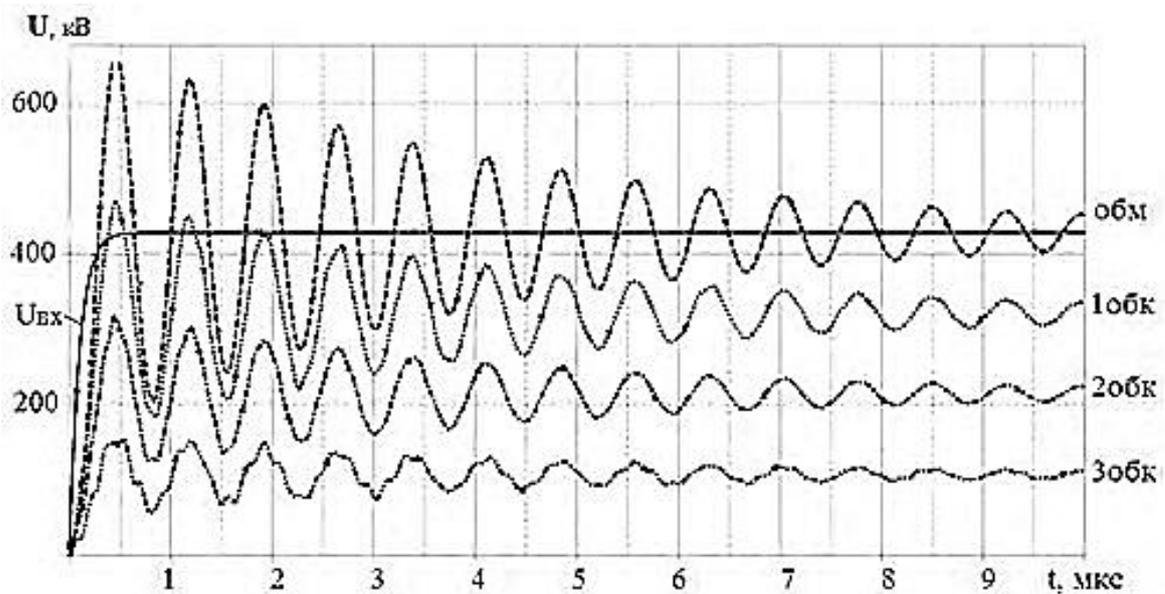


Рисунок 3.19 – Осциллограммы напряжений в середине обмотки для режима коммутации линейного разъединителя

На осциллограмме видно, что при воздействии на первичную обмотку прямоугольного импульса в ней возникает резонанс напряжений, с наибольшей амплитудой 670 кВ в середине обмотки, что соответствует кратности внутреннего перенапряжения  $1,56 U_{вх.макс.}$ .

Следует отметить, что амплитуда внутренних перенапряжений сильно зависит от длительности фронта падающей волны напряжения.

Из приведённых на рисунке 3.19 осциллограмм можно сделать очевидный вывод относительно мероприятия по снижению глубины резонансных явлений: нужно любым из доступных способов увеличивать длительность фронта входного напряжения.

### **3.5 Выводы по главе**

Результаты математического и физического моделирования трансформатора тока ИМВ 550 показывают, что на резонансной частоте распределение напряжения по слоям изоляции первичной обмотки становится неравномерным.

Максимальные напряжения возникают в средней части слоя изоляции между проводником и первой обкладкой. По сравнению с напряжением промышленной частоты их величина увеличивается более чем в полтора раза.

Пробой одного из слоёв изоляции может привести к непропорциональному усилению неравномерности распределения импульсного напряжения по слоям изоляции и, соответственно, ускоренному старению изоляции.

## ГЛАВА 4 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

В настоящей главе представлены результаты химического анализа трансформаторного масла. Основные результаты опубликованы в работах [117, 118]

### 4.1 Экспериментальная проверка метода диагностирования изоляции по частотной характеристике диэлектрической потерь

В п. 1.4 автор анализировал методы диагностирования и мониторинга состояния изоляции трансформаторов тока. К описанным методам можно добавить относительно новый метод диагностирования – измерение частотной характеристики диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) и ёмкости. По своему физическому содержанию этот метод направлен на оценку степени увлажнения бумажной изоляции и принципиально может заменить описанные в п.1.4 методы профилактических испытаний с измерением  $tg\delta$  и токов поляризации-деполяризации.

Опробование метода проводили на трансформаторе тока ИМВ 550. Аппарат подвергался испытаниям в 2006 г. и десять лет после них хранился на открытой испытательной площадке Сибирского НИИ энергетики (рисунок 4.1).

Измерения проводились с помощью прибора IDAX-300 производства фирмы «Megger». Прибор позволяет делать измерение тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) и ёмкости на дискретных частотах от 0,0001 до 1000 Гц. Это даёт возможность определять влажность или загрязнение твёрдой изоляции. Полученные кривые зависимостей  $tg\delta$  и ёмкости от частоты испытательного напряжения обрабатываются с помощью специализированного ПО MODS. В основе моделирования заложена модель «комбинированного конденсатора» (рисунок 4.2).



Рисунок 4.1 – Измерение диэлектрических характеристик трансформатора тока



Рисунок 4.2 – Схема модели «комбинированного конденсатора»

В ней все слои бумаги и распорки объединены, соответственно, в продольный и поперечный слой целлюлозы, а остальное пространство между обкладками заполнено маслом. Программа MODS подбирает параметры «комбинированного конденсатора», обеспечивая наиболее точное совпадение спектрограммы модели с измеренными показателями изоляции. Измерения проводились по двум схемам (рисунок 4.3) с использованием охранного электрода, устраняющего влияние токов утечки по поверхности на результаты измерений.

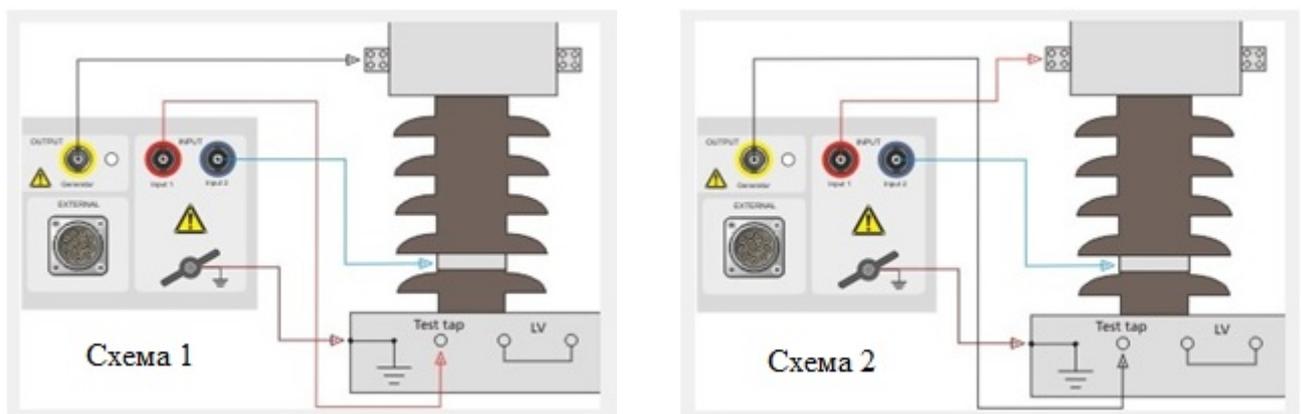


Рисунок 4.3 – Схемы измерений диэлектрических характеристик

Результаты измерений диэлектрических характеристик по схемам получились достаточно близкими друг к другу и приведены на рисунках 4.4 и 4.5.

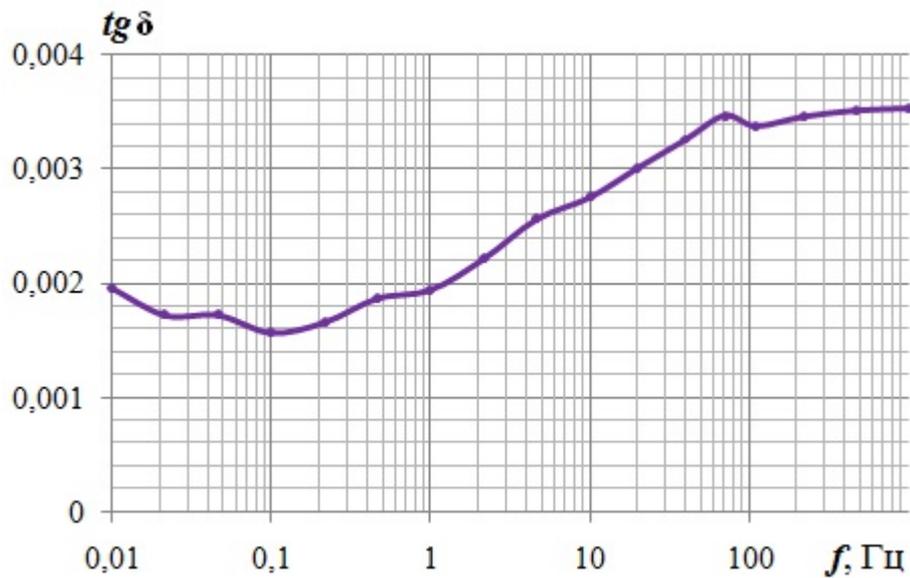


Рисунок 4.4 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты

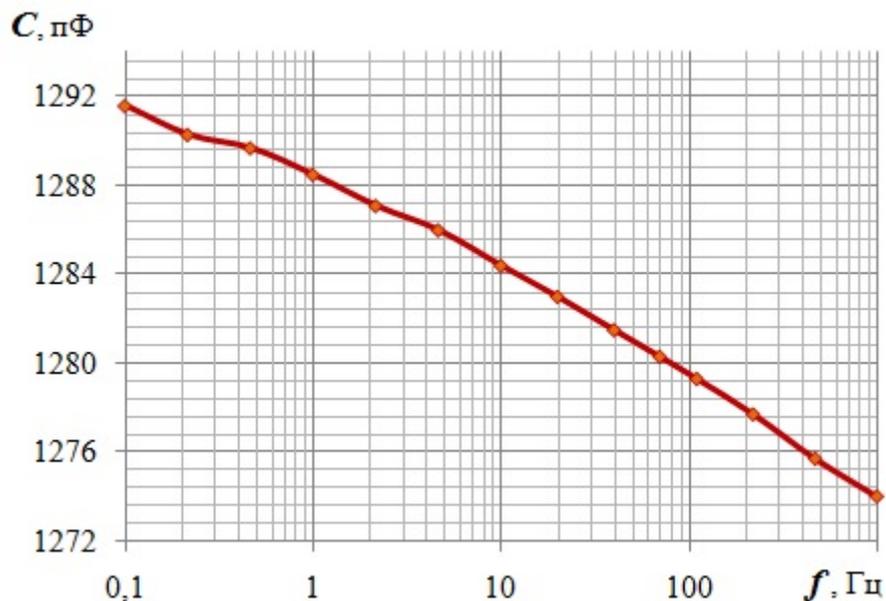


Рисунок 4.5 – Зависимость ёмкости изоляции от частоты

Несмотря на несколько нелогичный характер зависимости  $tg \delta$  от частоты, его абсолютные величины не выходят за предельно допустимые значения. Небольшой рост потерь в области сверхнизких частот говорит о небольшом увлажнении изоляции. Ёмкость изоляции также близка к паспортному значению (1250 пФ), а монотонный рост ёмкости с понижением частоты подтверждает

лёгкое увлажнение изоляции. Степень увлажнения бумажной изоляции составила 0,7 %, что вполне допустимо для дальнейшей эксплуатации ТТ.

#### **4.2 Методики и результаты расширенных исследований свойств масла в изоляции трансформаторов тока**

В данном и следующем параграфах приведены методика и результаты исследований, направленных на прогноз поведения импортного масла, залитого в ТТ типа ІМВ 550 в условиях эксплуатации, характерных для российского электросетевого хозяйства. Постановка задач исследований была осуществлена научным руководителем диссертанта, сами исследования были проведены в Институте органической химии СО РАН, а их обсуждение было проведено с участием автора.

В рамках выяснения свойств импортного масла специалистами СО РАН было проведено «искусственное старение» проб отечественного масла ГК, и двух проб шведского масла свежего ШМ-1 и бывшего в эксплуатации масла ШМ-2. В пробы масел вводили добавки «ударной дозы» (2 % весовых) антиоксидантной присадки агидол, а также декалин и ундекан, моделирующие поведение соответственно нафтеновых и парафиновых компонентов трансформаторных масел.

*Методика «искусственного старения» масел.* Образец трансформаторного масла объемом 30 мл помещали в пикнометр объемом 100 мл, снабженный воздушным холодильником, и выдерживали при температуре 150 °С без перемешивания со свободным доступом воздуха к поверхности масла в течение 80 часов. Через 16, 40 и 80 ч. отбирали пробы объемом 5 мл и осуществляли контроль процесса старения масел методом ИК спектроскопии по появлению полос поглощения продуктов окисления углеводов и увеличению их интенсивности, а также по изменению интенсивности полос поглощения ионола.

Искусственно состаренные образцы анализировали дополнительно методом ЯМР-спектроскопии. Для них также определяли кислотное и перекисное числа.

*Расширенный химический анализ* включал определение дополнительных макрохарактеристик масел с использованием стандартных методик определения.

В таблицах 4.1, 4.2 приведены результаты химического анализа исходных и окисленных трансформаторных масел.

Таблица 4.1– Данные химического анализа образцов трансформаторных масел

Показатели	ГК	ШМ-1	ШМ-2
Кинематическая вязкость, <i>сст</i> при 20 °С	21,4	не измеряли	16,0
при 50 °С	7,9		6,1
Кислотное число, <i>мг КОН/г</i>	отсутствует	<b>0,09</b>	отсутствует
Летучие, % вес.при 100 °С	4,6	2,4	4,6
Йодное число, <i>гJ<sub>2</sub>/100 г</i>	6,3	8,5	8,6
Перекисное число, <i>ммоль О/кг</i>	отсутствует	<b>1,5</b>	отсутствует

Таблица 4.2– Данные химического анализа образцов исходных и окисленных масел, в том числе, содержащих дополнительное количество агидола

Шифр образца	Кислотное число, мг КОН/г	Перекисное число, ммоль О/кг	Полосы поглощения, см <sup>-1</sup>	
			3430	1630
ГК	отсутствует	отсутствует	-	-
ГК-80	1.7	5	-	-
ГК(+АГ)-80	0.25	отсутствует	-	-
ШМ-1	0.09	1.5	-	-
ШМ-1-80	3.1	10	-	-
ШМ-1(+АГ)-80	2.4	отсутствует	-	-
ШМ-2	отсутствует	отсутствует	-	-
ШМ-2-80	0.13	0.8	-	-
ШМ-2(+АГ)-80	отсутствует	отсутствует	-	-

Из приведённых данных видно, что образцы ШМ характеризуются меньшими значениями вязкости в сравнении с образцом ГК. Следует обратить внимание на отличные от нуля кислотное и, особенно, перекисное число масла ШМ-1. В таблице 4.1 их значения выделены полужирным шрифтом.

*Масс-спектрометрический* анализ проводили на приборе Finnigan MAT-8200 с прямого ввода при температуре источника ионов от 200 до 305 °С. Установлено, что компоненты образцов трансформаторных масел ГК, ШМ-1 и ШМ-2

полностью испаряются при температуре источника ионов  $\leq 275$  °С. Максимальные определенные массы ионов в исследуемых образцах составили: ГК –  $M_{\max}^+ = 421$  а.е.м.; ШМ-1 –  $M_{\max}^+ = 375$  а.е.м. и ШМ-2 –  $M_{\max}^+ = 293$  а.е.м.

*Хромато-масс-спектрометрический* анализ осуществляли системой Hewlett Packard G1081A, состоящей из газового хроматографа HP 5890 серии II и масс-селективного детектора HP 5971. Колонка HP5 (5 % - дифенил, 95 % - диметилсилоксан): 30 м×0,25 мм× 0,25 μм. Газ-носитель – гелий, 1 мл/мин. Режим повышения температуры колонки: 2 мин. при 50 °С, далее 10 °С/мин., 5 мин. при 280 °С. Температура источника ионов 173 °С. Данные фиксировали со скоростью 1,2 скан/с в массовой области (30 – 650) а.е.м.

Полученные методом ГЖХ-МС хроматограммы образцов ГК, ШМ-1 и ШМ-2 и масс-спектры отдельных компонентов, имеющих различные времена удерживания (RT) показали практически совпадение образцов ШМ-1 и ШМ-2 по химическому составу и их существенное различие с маслом ГК.

По результатам компьютерной обработки данных ГЖХ-МС установлено, что в масле ГК ряд углеводородов нафтенового, *n*- и *изо*-парафинового строения присутствуют в концентрациях, значительно превышающих средние. На основании информации баз данных Wiley и NISTO 2 этим соединениям с большой степенью вероятности можно приписать следующее строение: М 192 – тетрадекагидрофенантрен; М 212 – 2,6,10-триметилдодекан; М 282 – 2,6,10,14-тетраметил-гексадекан; М 278 – 2-децилдекагидронафталини М 310 – *n*-докозан.

*ЯМР спектроскопия.* При анализе методом спектроскопии ЯМР веществ нерегулярного строения, как природных (продукты переработки древесины, угля, нефти), так и синтетических (полимеры), использовались методики, основанные на определении характеристик формы спектральной кривой [104]. Такие характеристики, как резонансные диапазоны атомов с различным химическим окружением и интегральные интенсивности соответствующих областей спектра, позволяют охарактеризовать строение исследуемых объектов фрагментным составом, то есть долями атомов данного типа от общего количества атомов в образце:

$$A_i = I_i / \sum I_i \quad (4.1)$$

Спектры ЯМР<sup>1</sup>H и <sup>13</sup>C регистрировали на приборе BrukerDRX500 для растворов образцов в CDCl<sub>3</sub> (концентрация 50-75%). В качестве внутреннего стандарта использовали сигнал растворителя.

Обработку спектров ЯМР <sup>1</sup>H проводили путём разделения спектральной кривой при интегрировании по локальным минимумам спектральной плотности. Отнесение диапазонов к определённым типам протонов осуществляли на основе справочных данных [105] и с учётом информации о спектральных характеристиках различных фракций нефти.

*УФ спектроскопия.* УФ спектры образцов масел регистрировали на приборе Hewlett Packard 8453 для растворов образцов в декане (концентрация 0.12 г/100 мл) в кювете  $l=10$  мм по методикам [104] и справочным данным [106, 107]. Установлены следующие длины волн максимумов и интенсивности полос поглощения:

- ~ УФ спектр ГК,  $\lambda_{\max}$ , нм (D): 232 (1.91), 260 (0.49), 264 (0.46), 278 (0.46);
- ~ УФ спектр ШМ-1,  $\lambda_{\max}$ , нм (D): 229 (1.64), 273 (0.47), 278 (0.45);
- ~ УФ спектр ШМ-2,  $\lambda_{\max}$ , нм (D): 229 (1.48), 273 (0.33), 278 (0.32).

Данные УФ спектрофотометрии свидетельствуют о подобии спектров ( $\lambda_{\max}$  и D) образцов ШМ-1 и ШМ-2 и их отличии от образца ГК.

Методами масс- и хроматомасс-спектрометрии установлено, что углеводороды образцов ГК, ШМ-1 и ШМ-2 имеют достаточно близкую летучесть и не содержат в достоверно определяемых количествах высокомолекулярных (высококипящих) компонентов.

Хроматограммы обоих типов масел представляют собой практически неразделенный на отдельные пики широкий сигнал, на фоне которого во всех образцах фиксируется пик агидола. Судя по форме сигнала и времени выхода из хроматографической колонки, образцы ШМ имеют более узкий и равномерно распределенный по массовым числам углеводородный состав в сравнении с маслом ГК. Поскольку углеводороды трансформаторных масел имеют близкие адсорбционные характеристики, более высокие времена удерживания

компонентов масла ГК в хроматографической ГЖ-колонке свидетельствуют о большей средней молекулярной массе входящих в его состав углеводородов. В соответствии с этим, в масс-спектрах образца ГК зафиксированы ионы с более высокими массами, чем в образцах ШМ. В масс-спектрах исследуемых смесей углеводородов, характеризующихся различными временами удерживания, обнаружено присутствие групп осколочных ионов общей формулы  $C_nH_{2n-3}$  – в образце ГК, и  $C_nH_{2n-5}$  – в образце ШМ (ММ+ 97 и 95, 111 и 109, 125 и 123, 151 и 149, 179 и 177, 207 и 205, соответственно). Это обстоятельство указывает на большую водородную недостаточность углеводородов в образцах ШМ, и возможным вариантом интерпретации этого наблюдения представляется тезис о большей доле полициклических нафтеновых углеводородов в образцах ШМ, нежели образце ГК. В образце ГК некоторые углеводороды нафтенового, *n*- и *изо*-парафинового строения присутствуют в концентрациях, значительно превышающих средние.

Мониторинг фрагментных составов углеводородов образцов масел методом ЯМР  $^1H$  и  $^{13}C$  проведен по методикам, аналогичным описанным в [104] для анализа различных фракций нефти (бензинов, дизельных топлив, масел и пр.). Наиболее отчетливые различия между маслами ГК и ШМ, фиксируемые по спектрам  $^1H$  и  $^{13}C$ , касаются содержания в них *ароматических* углеводородов и степени замещения атомов водорода на алкильные группы в последних:

~ во-первых, судя по относительной доле структурных фрагментов  $\Sigma Nap$  и  $\Sigma Cap$ , масла ШМ-1 и ШМ-2 в 3,5 – 4,5 раза превосходят масло ГК по содержанию ароматических фрагментов:

$$\Sigma Nap_{ШМ} / \Sigma Nap_{ГК} \sim 3,5 \quad \text{и} \quad \Sigma Cap_{ШМ} / \Sigma Cap_{ГК} \sim 4,5$$

$$C_{алГК} / C_{арГК} \sim 140 \quad \text{vis} \quad C_{алШМ} / C_{арШМ} \sim 31;$$

~ во-вторых, рост отношения  $\Sigma Cap / \Sigma Nap$  при переходе от ГК к ШМ указывает на увеличение количества алкильных заместителей при ароматических фрагментах:  $\Sigma Cap_{ГК} / \Sigma Nap_{ГК} \sim 2,3$        $\text{vis} \quad \Sigma Cap_{ШМ} / \Sigma Nap_{ШМ} \sim 3;$

~ в-третьих, величины  $N_b$  и  $X_{C^{13}C}$  в спектрах образцов ШМ-1 и ШМ-2 свидетельствуют о большем количестве метилзамещённых бензолов (*Сам*) и

наличии в этих образцах, конденсированных и алкилзамещённых ароматических соединений (*Саак*), которые отсутствуют в масле ГК. В пользу этого свидетельствует и батохромный сдвиг длинноволнового максимума поглощения в области 260-280 нм в УФ спектрах образцов [106].

Определение *алифатического* фрагментного состава ТМ по спектрам  $^1\text{H}$  ЯМР затруднено из-за значительного перекрывания резонансных областей различных типов алифатических групп, особенно вторичных и третичных. Вследствие этого интегрирование областей спектра  $^1\text{H}$  по минимумам спектральной плотности показывает завышенные значения показателя *N<sub>m</sub>* (третичные). В спектре  $^{13}\text{C}$ , напротив, часть атомов *С<sub>m</sub>* имеет сигналы в области атомов *С<sub>v</sub>*, *С<sub>ч</sub>* (вторичные, четвертичные), которые невозможно достоверно выделить без регистрации соответствующих подспектров.

Сопоставляя полученные данные, следует отметить, что различия образцов ГК и ШМ по содержанию третичных структурных фрагментов (*СН*-групп) спектрально не фиксируются. По содержанию вторичных фрагментов (*СН<sub>2</sub>*-групп) образец ГК превосходит образцы ШМ, а по количеству первичных (*СН<sub>3</sub>*-групп) – уступает им. Эти обстоятельства, а также меньшая доля *СН<sub>3</sub>*-групп, связанных с ароматическими и изомеризованными алкильными фрагментами, указывают на наличие в углеводородах образца ГК более длинных неразветвлённых алкильных цепей, а в углеводородах образцов ШМ-1 и ШМ-2 – более коротких разветвлённых фрагментов, а также метильных заместителей.

Несмотря на то, что индивидуальные сигналы, принадлежащие продуктам окисления углеводородов в образцах масел, не фиксируются, спектральная плотность в области резонанса атомов углерода кислородсодержащих фрагментов во всех образцах отлична от нуля, что указывает на наличие связей *С-О* в компонентах масел. При этом у образца ШМ-1 их больше, чем у ГК и ШМ-2.

В ИК-спектрах образцов ГК, ШМ-1 и ШМ-2, измеренных по методикам [108, 109] присутствуют полосы поглощения в коротковолновой области, обусловленные валентными колебаниями *С-С*-связей и деформацией *С-Н*-связей (1400-1300 и  $\sim 720\text{ см}^{-1}$ ). Характерные для углеводородов полосы поглощения,

обусловленные характеристическими частотами валентных колебаний С-Н-связей (метильные, метиленовые и метиновые группы), находятся в области 3000-2800 см<sup>-1</sup>. Полоса поглощения при ~720 см<sup>-1</sup>, характерная для длинных цепей типа – (СН<sub>2</sub>)*n*-, где *n*≥4, проявляется только в спектре образца ГК. Полос поглощения, характерных для продуктов окисления углеводородов, а именно соединений, содержащих карбонильные группы, в характерной для них области 1600-1800 см<sup>-1</sup>, в спектрах исходных образцов не зафиксировано.

Методом ВЭЖХ проведен анализ содержания фурановых соединений в образцах ГК, ШМ-1 и ШМ-2. Показано, что суммарное содержание фурановых соединений в ШМ-1 и ШМ-2 составляет менее 1,5 мг/л, что на порядок ниже признанной опасной для состояния бумажной изоляции концентрации фуранов (более 12 мг/л). На ВЭЖ-хроматограмме масла ГК пиков фурановых соединений не обнаружено. Это свидетельствует практически об отсутствии продуктов деструкции целлюлозы в маслах.

По результатам анализов масел можно сделать следующие выводы:

~ образцы масел ШМ-1 и ШМ-2 имеют близкие компонентный углеводородный и фрагментный составы, которые, в свою очередь, отличаются от образца ГК;

~ масла ШМ имеют более узкий и равномерно распределенный по молекулярным массам углеводородный состав в сравнении с маслом ГК;

~ масла ШМ имеют меньшую среднюю молекулярную массу входящих в его состав углеводородов в сравнении с маслом ГК;

~ в маслах ШМ содержание ароматических соединений в 3 раза выше, чем в масле ГК, при этом в них велика доля полиалкилзамещённых и конденсированных аренов, практически отсутствующих в масле ГК;

~ алифатические углеводороды масел ШМ характеризуются относительно короткими и разветвленными алкильными фрагментами, а также метильными заместителями в ароматических фрагментах, тогда как масло ГК характеризуются более длинными и неразветвленными алкильными цепями;

~ в маслах ШМ обнаружены признаки большей водородной недостаточности, которые интерпретированы как наличие большей доли полициклических нафтеновых соединений по сравнению с маслом ГК;

~ концентрация агидола в образцах ШМ-1, ШМ-2 и ГК составила ~0.3%, что отвечает требованиям ГОСТ к трансформаторным маслам;

~ кислотное и перекисное числа образца масла ШМ-1 указывают на большую степень развития процессов старения в нём по сравнению с маслами ШМ-2 и ГК.

Определение *остаточного ресурса масел* проводилось по результатам испытаний на старение. Установлено, что при искусственном старении образцов ШМ-1, ШМ-2 и ГК действием высокой температуры и контактом с воздухом в одинаковых условиях, образец ШМ-1 окисляется быстрее в сравнении с образцами ШМ-2 и ГК.

Так, по прошествии 16 часов искусственного старения концентрация агидола в образце ШМ-1 уменьшилась примерно в 3 раза, тогда как в образцах ГК и ШМ-2 она не изменилась. В ИК-спектрах образца ШМ-1-16 наблюдались полосы поглощения, характерные для карбонильных соединений. В отличие от этого, в спектре образца ГК появление полос поглощения карбонильных соединений отмечено по прошествии 40 часов, а в спектре образца ШМ-2 отсутствовали полосы поглощения карбонильных соединений и по прошествии 80 часов искусственного старения. Следует отметить, что в течение всех 80 ч старения образца ШМ-2 концентрация агидола в нём практически не изменялась.

В спектрах  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР искусственно состаренных образцов масел обнаруживаются сигналы кислородсодержащих структурных фрагментов. Значения параметров *Нок* и *Сок* практически одинаковы для образцов ШМ-2 и ШМ-2-80, незначительно возрастают при переходе от образца ГК к образцу ГК-80 и более заметно увеличиваются при переходе от образца ШМ-1 к образцу ШМ-1-80. Эти данные согласуются с результатами, полученными с использованием ИК-спектроскопии.

Химический анализ образцов масел (таблица 4.2) показал, что по прошествии 80 ч искусственного старения кислотное и перекисное числа образцов ШМ-1,

ШМ-2 и ГК возрастали по сравнению с исходными, при этом наибольшие значения этих показателей зафиксированы у образца ШМ-1 (кислотное число 3,1; перекисное число 10).

В целом, полученные результаты по искусственному старению модельных углеводородов хорошо согласуются с имеющимися в литературе сведениями о большей скорости окисления нафтеновых углеводородов и большей стабильности перекисей нафтенов по сравнению с парафинами. Следовательно, увеличение доли нафтеновых углеводородов в составе ТМ может способствовать большей скорости его старения, в том числе, накоплению перекисных соединений.

Различие в поведении образцов ШМ-1 и ШМ-2 при искусственном старении не может быть обусловлено различием в углеводородном составе масел: результаты проведенных анализов с использованием физических методов показали идентичность структурно-группового состава углеводородов. В спектрах всех исходных образцов, полученных с использованием различных физических методов исследования, включая наиболее чувствительный метод ИК, отсутствуют признаки наличия продуктов старения в достоверно определяемых количествах. В такой ситуации, быстрое искусственное старение образца ШМ-1 по сравнению с образцами ШМ-2 и ГК, фиксируемое по появлению в спектрах ИК и интенсивности роста полос поглощения, характерных для продуктов окисления, следует связать с различием величин кислотного и перекисного чисел у исходных образцов.

В таком случае, эти показатели, во-первых, представляются наиболее чувствительными для определения текущего состояния трансформаторного масла, и, во-вторых, способными указать на возможность быстрого последующего развития процессов старения практически без индукционного периода. При этом введение даже «ударной дозы» агидола в образец ШМ-1 лишь несколько замедлило процесс дальнейшего старения, но не стабилизировало состояние масла, как это произошло в случае образца ГК.

В итоге испытаний на старение установлено, что:

~ ресурс образца ШМ-1 как ТМ исчерпан: скорость его последующего старения примерно в 2.5 раза выше, нежели образца ГК, в то время как образец ШМ-2 не изменил своих химических и спектральных характеристик в течение всего периода искусственного старения;

~ введение "ударной дозы" агидола в образец ШМ-1 не предотвращает его последующего быстрого старения, в отличие от ситуации с образцом ГК.

#### **4.3 Методики и результаты исследований продуктов, составляющих X-воск в бумажной изоляции**

При исследованиях масел особое внимание было уделено процессам, которые могли спровоцировать образование так называемого X-воска, обнаруженного на бумажной изоляции первичной обмотки при послеаварийной разборке конструкции (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Бумажная изоляция первичной обмотки, пропитанная маслом и местами «склеенная» X-воском

По результатам «искусственного старения» модельных углеводов декалина и ундекана подтвердился вывод авторов [80] о том, что нефтеновые углеводороды более склонны к образованию стабильных перекисных соединений при окислении: свободных кислот, эфиров, спиртов, карбонильных соединений. В шведских маслах нефтеновые компоненты преобладают над парафиновыми. Таким образом, литературные данные в совокупности с полученными в данной

работе результатами исследования искусственного старения и состава X-воска указывают на повышенную склонность этих масел к образованию осадков (олигомеров первичных продуктов окисления), в том числе, на бумажной изоляции.

Не исключено, что этому процессу может способствовать длительное хранение трансформаторов, заправленных ТМ, при отрицательных температурах. По данным [94], при низких температурах в органических материалах, стабилизированных стерически затруднёнными фенолами, происходит образование относительно устойчивых перекисных соединений хинолидной структуры. В результате, процесс «антиокислительной работы» присадки тормозится на промежуточной стадии, а образующиеся в ней хинолидные перекиси становятся потенциальными окислителями, способными инициировать полимеризацию углеводов.

*Методики экстракции X-воска.* В процессе искусственного окисления в маслах образовывались различные продукты, в том числе воскообразные, в том числе, те из них, которые были обнаружены на бумажной изоляции повреждённого ТТ. Экстракцию X-воска из этой бумаги проводили путем последовательной обработки бумаги несколькими растворителями в двух вариантах.

Оба варианта обработки бумажной изоляции обеспечили практически одинаковые количества экстрактивных веществ: 40 и 37% соответственно. Три основные фракции, полученные при первом варианте обработки, имели одинаковые физические свойства и близкие инфракрасные спектры поглощения.

Второй вариант обработки позволил разделить X-воск на «жидкую» (ХВ-1) и «твёрдые» (ХВ-2, ХВ-3) фракции, которые анализировали методами ИК-, ЯМР- и масс-спектрометрии. В итоге определяли молекулярный вес и элементный состав фракций, а также температуру плавления, и перекисное число.

Компоненты образца X-воска характеризуются существенно меньшей летучестью по сравнению с образцами трансформаторных масел

В ИК-спектре образца ХВ присутствовали как полосы поглощения, характерные для углеводов масла ШМ-1, так и интенсивные полосы поглощения в области колебаний карбонильных ( $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$ ) и гидроксильных ( $1600$  и  $3400 \text{ см}^{-1}$ ) групп. При анализе образцов-фракций, полученных разделением суммы экстрактивных веществ (таблица 4.3), установлено следующее.

Таблица 4.3– Характеристики и данные химического анализа фракций X-воска

Шифр образца	Внешний вид	$T_{\text{плавл.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Молекулярная масса (средняя), а.е.м.	Элементный состав, %	Перекисное число, ммоль О/кг
ХВ	светло-коричневый	вязкий, липкий			$\sim 580$
ХВ-1	светло-коричневый	жидкий	$\sim 365$		$\sim 560$
ХВ-2	желтый	92-93	$\sim 1460$	С 83.65 Н 11.92	$\sim 820$
ХВ-3	белый	$>300$	$>1500^*$		$\gg 1000$

Образец ХВ-1 имеет более вязкую консистенцию по сравнению с маслами, образец ХВ-2 - твёрдый (температура плавления  $92-93 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), образец ХВ-3 - твёрдый и плавится при температуре выше  $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Температуры плавления образцов коррелируют с их средними молекулярными массами:  $M_{\text{ХВ-1}}=365$ ,  $M_{\text{ХВ-2}}=1460$ ,  $M_{\text{ХВ-3}}>1500$  а.е.м.

Для каждого из упомянутых образцов определены перекисные числа (таблица 4.3), которые также указывают на значительные количества перекисных соединений, увеличивающиеся с ростом молекулярной массы и температуры плавления при переходе от ХВ-1 к ХВ-3.

Для подтверждения наличия большого количества кислородсодержащих фрагментов во фракциях X-воска был проведен элементный анализ образца ХВ-2 (см. таблицу 4.3): определены содержания С и Н. Установлено полное отсутствие негорючих продуктов (нулевая зольность) в составе образца, что указывает на отсутствие в нем минеральных веществ (например, солей и окислов металлов). По

недостатку содержания С и Н оценено содержание О в составе образца, составившее примерно 4,4 % массы. По этим данным рассчитана брутто-формула среднестатистической молекулы образца:  $C_{100}H_{172}O_4$  (молекулярная масса равна 1436 а.е.м.). Вычисленная величина свидетельствует о том, что компоненты образца ХВ-2 (фракции Х-воска) отвечают результату окислительной сшивки четырех среднестатистических углеводородных молекул масла ( $\sim C_{25}H_{43}$ ). Сопоставление этих данных с оценкой удельного количества перекисных кислородов, выполненное с учетом величины перекисного числа, указывает на то, что каждая третья полимерная молекула ХВ-2 содержит перекисный мостик -О-О-.

Таким образом, установлено, что Х-воск состоит из олигомеризованных углеводородов масел, содержащих активные перекисные и полярные карбонильные и карбоксильные группы.

#### 4.4 Выводы по главе

1. Оценка увлажнения изоляции методом диэлектрической спектроскопии имеет хорошие перспективы для внедрения в практику профилактических испытаний в процессе эксплуатации трансформаторов тока.

2. По совокупности полученных экспериментальных данных, инструментального анализа образцов трансформаторных масел и выделенного с бумажной изоляции Х-воска установлено следующее.

а В пределах погрешностей использованных методов инструментального и химического анализа образцы ШМ-1 и ШМ-2 трансформаторному маслу марки Nitro 11GX. По углеводородному составу образец ГК отличен от образцов ШМ и тождественен маслу марки ГК.

б Образец ШМ-1 отличается от образца ШМ-2 величинами кислотного числа, и более значительно – перекисного числа, а также более высокой скоростью образования и накопления продуктов окисления углеводородов (карбонил- и пероксидсодержащих производных) в условиях искусственного старения.

в Установлено, что величина перекисного числа является чувствительным индикатором состояния ТМ, т.е. способна указать на возможность быстрого развития процессов старения ТМ. В этой связи, для профилактики аварийности трансформаторов представляется обоснованным введение проверки ТМ на устойчивость к окислению путём определения перекисного числа по известным методикам как перед вводом маслонаполненного оборудования в эксплуатацию после длительного хранения, так и при дозаливке новыми порциями масла.

3. Установлено, что X-воск, выделенный с бумажной изоляции, представляет собой олигомерные ( $MM > 1500$  а.е.м.) производные углеводов с перекисными и карбонильными группами.

4. С учётом того, что химически наиболее устойчивые перекисные соединения образуются при окислении нафтеновых углеводов, масла с повышенным содержанием этих компонент (типа Nitro 11GX), очевидно, более склонны к образованию X-воска установленной природы на бумажной изоляции.

5. Не исключено, что процессу окисгенирования углеводов может способствовать хранение масла на холоде, при котором из агидола образуются относительно устойчивые хинолидные перекиси, являющиеся инициаторами окисления и полимеризации углеводов. Полярность молекул органических пероксидов и повышенная склонность органических гидропероксидов к сорбции на целлюлозе посредством водородной связи предопределяет возможность их локального концентрирования на бумажной изоляции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненной работы состоят в следующем:

1. В результате проведённых испытаний на подстанции «Итатская – 1150 кВ» было выявлено возникновение высокочастотных и относительно слабо затухающих колебаний тока с несколькими резонансными частотами 880 кГц, 1,8 МГц и 33 МГц. Колебания слабо выражены в осциллограмме напряжения, но, отчетливо просматриваются в осциллограммах тока. Можно предположить, что эти колебания могут быть связаны с возбуждением свободных колебаний напряжения с резонансной частотой внутри самого трансформатора тока. Из общих представлений о высокочастотных перенапряжениях следует вывод о том, что эти напряжения могут превышать внешнее напряжение и вызывать ускоренное старение изоляции ТТ. В пределе они могут быть сопоставимы с электрической прочностью изоляции.

2. Результаты математического и физического моделирования трансформатора тока IMB 550 показывают, что на резонансной частоте распределение напряжения по слоям изоляции первичной обмотки становится неравномерным. Максимальные напряжения возникают в средней части слоя изоляции между проводником и первой обкладкой. По сравнению с напряжением промышленной частоты их величина увеличивается более чем в полтора раза.

3. Пробой одного из слоёв изоляции может привести к непропорциональному усилению неравномерности распределения импульсного напряжения по слоям изоляции и, соответственно, ускоренному старению изоляции.

4. Оценка увлажнения изоляции методом диэлектрической спектроскопии имеет хорошие перспективы для внедрения в практику профилактических испытаний в процессе эксплуатации трансформаторов тока.

5. По сравнению с маслом марки ГК масло Nitro 11GX отличается высоким содержанием ароматических соединений, и поэтому при нарушении герметичности его деградация происходит быстрее, и с большей вероятностью образования X-воска, состоящего из олигомерных производных углеводородов с

перекисными и карбонильными группами с молекулярной массой не менее 1500 а.е.м.

## ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ТТ – измерительный трансформатор тока;

ТМ – трансформаторное масло;

ПС – подстанция;

ОРУ – открытое распределительное устройство;

СО РАН – Сибирское отделение Российской Академии Наук;

а.е.м. – атомные единицы массы;

ГК – марка трансформаторного масла, полученного методом гидрокрекинга;

ШМ-1, ШМ-2 – обозначение проб шведского масла, свежего и бывшего в эксплуатации;

АГ – антиокислительная присадка агидол;

ГЖХ – газожидкостная хроматография;

ЯМР – ядерно-магнитный резонанс;

УФ – ультрафиолетовый;

ИК – инфракрасный;

ВЭЖХ -

ХВ-1, ХВ-2 и ХВ-3 – фракции Х-воска;

ВЧП – высокочастотные перенапряжения;

ОПН – ограничитель перенапряжений нелинейный;

ЧР – частичный разряд;

(Х)АРГ – (хроматографический) анализ газов, растворённых в масле;

Р – разъединитель;

ШР – шунтирующий реактор;

В – выключатель;

АТ – автотрансформатор.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
- 2 Справочник по проектированию подстанций 35 – 500 кВ / Г.К. Вишняков, Е.А. Гоберман [и др.]; под ред. С.С. Рокотяна и Я.С. Самойлова. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 352 с.
- 3 ГОСТ 7746 – 2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 54 с.
- 4 Афанасьев, В.В. Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. – 416 с.
- 5 IEC 60044 – 1. Instrument transformers – Part 1: Current transformers, 2003. – Geneva: IEC Central Office, 2003. – 24 с.
- 6 Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова, 3-изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.
- 7 Трансформатор тока серии ТФРМ. Технические условия ТУ-16-90. ИБДШ.671214.016 ТУ. – Запорожье: Запорожский завод высоковольтной аппаратуры, 1990.
- 8 Трансформатор тока ТФКН-330. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ОВЛ 412.079 ТО. – Запорожье: Запорожский завод высоковольтной аппаратуры, 1971.
- 9 Трансформатор тока серии ТФНД. Паспорт ОВЛ. 468.233. – Запорожье: Запорожский завод высоковольтной аппаратуры, 1977.

10 Трансформатор тока серии ТФУМ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 0ВЛ412.079 ТО. – Запорожье: Запорожский завод высоковольтной аппаратуры, 1986.

11 Трансформатор тока серии ТФЗМ 110 – 500. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ВЛИЕ.670105.001 ТО. – Запорожье: Запорожский завод высоковольтной аппаратуры, 1984.

12 Трансформаторы тока 110–550 кВ серии SKF с элегазовой изоляцией. Каталог высоковольтного оборудования. – М.: Alstom Grid, 2016. – 42 с.

13 Трансформатор тока серии ИМВ: Руководство по эксплуатации. 1БП.768.011 РЭ. –Екатеринбург: АВВ, 2000.

14 Catalogue publication 1HSM95434 – 00 ru. Outdoor Instrument Transformers Buyer's Guide, Edition 4.1. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.abb.com>. – (Дата обращения: 14.05.2014).

15 Руководство по транспортировке, монтажу и техническому обслуживанию трансформаторов тока типа СА. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arteche.com>. – (Дата обращения: 09.09.2016)

16 Отчет о научно-исследовательской работе: «Анализ условий работы и состояния трансформаторов тока ТФРМ-500, ТФЗМ-500 и ИМВ-550 на ПС 1150 кВ Итатская». Работа: «Разработка рекомендаций по устранению ВЧ перенапряжений и рекомендаций по настройке защит на ПС «Итатская». Составление заключительного отчета об испытаниях» / Руководитель темы, к.т.н. А.С. Гайворонский. ОАО «Сибирский НИИ Энергетики». Новосибирск, 2003. – 42 с.

17 Дарьян, Л.А. Оценка изменения внутреннего давления в высоковольтном маслонаполненном электрооборудования с герметичными сильфонами / Л.А. Дарьян, С.М. Коробейников // Электричество. – 2008. – № 8. – С.64 – 65.

18 Дарьян, Л.А. Комплексный подход к решению проблем эксплуатационной надежности некоторых типов зарубежных измерительных трансформаторов / Л.А. Дарьян, Ю.А. Горюшин, В.А. Родионов // Доклад № П.05 на Симпозиуме Электротехника 2010. «Интеграция науки и производства». – М.: ТРАВЭК, 2004. – С. 36 – 43.

19 Дарьян, Л.А. Научные основы физико-химической диагностики высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с изоляцией конденсаторного типа: дис. ... д-ра техн.наук: 05.14.12 / Дарьян Леонид Альбертович. – Новосибирск, 2009. – 437 с.

20 Дарьян, Л.А. Исследование механизма повреждения внутренней изоляции трансформаторов тока с «газовой подушкой» / Л.А. Дарьян // Электрические станции. – 2008. – № 5. – С. 42 – 49.

21 Разевиг, Д. В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи / Д.В. Разевиг. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 213 с.

22 РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под науч. ред. Н.Н. Тиходеева. – 2-ое изд., перераб. и доп. – СПб.: ПЭИПКМинтоэнерго РФ, 1999. – 353 с.

23 Костенко, М.В. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения /М.В. Костенко, К.П. Кадомская [и др.]. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.

24 IEEE Working Group 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters // IEEE Trans. on Pow. Deliv. – 1992. – vol. 7, No. 1. – pp. 302 – 309.

25 Геллер, Б. Волновые процессы в электрических машинах / Б. Геллер, А. Веверка.// – Перевод с немецкого Л.И. Абрамова и З.А. Абрамовой под общей редакцией Г.Н. Петрова. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 268 с.

- 26 Kieny, J.C. Modeling a transformer at high frequency // LAB echo. –1992. – 1. – С. 4.
- 27 Popov, M. Analysis of very fast transients in layer-type transformer winding / M. Popov, L. van der Sluis [и др.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007.– vol. 22.– No. 1. – pp. 238 – 247.
- 28 Borghetti, A. Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers / A. Borghetti, A. Morched [и др.] // IEEE Trans. on Pow. Deliv. – 2009. – vol. 24. – No. 1. – pp. 360 – 372.
- 29 Adamczyk, B. Simulation of initial voltage distribution in layer type transformer winding / B. Adamczyk, M. Florkowski // Proc. of 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 2015. – Paper 220. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон, опт. диск (CD-ROM).
- 30 Morched, A. S. Analysis of internal winding stresses in EHV generator set-up transformer failures / A. S. Morched, L. Marti [и др.] // IEEE Trans. on Pow. Deliv. – 1996. – vol. 11.– No. 2. – pp. 888 – 894.
- 31 Florkowski, M. Terminal based recognition of resonance overvoltages in transformer windings / M. Florkowski, J. Furgal //Proceedings of the 16th Intern. symp. on High Voltage engineering, Innes House, Johannesburg, 2009. – Paper A – 1.– [Электронный ресурс]. – 1 электрон.- опт. диск (CD-ROM).
- 32 Florkowski, M. Analysis of Transient Voltage Distributions in Transformer Windings at Different Insulation Conditions / M. Florkowski, J. Furgał, P. Pająk // IEEE Trans. on DEIS. – 2012. – vol. 19. –No 6. – pp. 1991 – 1998.
- 33 Florkowski, M. Impact of surge steepness on propagation of high frequency overvoltages in transformers / M. Florkowski, J. Furgał [и др.] // Proc. of 19th Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 2015.– Paper 64. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.- опт. диск (CD-ROM).

34 Hori, M. Internal winding failure due to resonance overvoltages in distribution transformer caused by winter lightning / M. Hori, M. Nishioka [и др.] // IEEE Trans. on Pow. Deliv. – 2006. – vol. 21. – No 3. – pp. 1600 – 1606.

35 Villa, A. Switching overvoltage during disconnection of 765 kV reactor at substation “La Arenosa” in Venezuelan system / A. Villa // Proceedings of the 43rd CIGRE Session, Paris, 2010. – Paper A3 – 209. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

36 Шиллер, О.Ю. Перенапряжения при коммутации блочного трансформатора 500 кВ элегазовым выключателем / О.Ю. Шиллер, Ю.А. Лавров [и др.] // Электро. – 2010. – № 6. – С. 24–27.

37 Шиллер, О.Ю. Управляемое включение шунтирующих реакторов / О.Ю. Шиллер, А.Г. Овсянников // Электро. – 2012. – № 4. – С. 21 – 25.

38 Ковалев, Б.И. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше / Б.И. Ковалев, А.В. Ковалева [и др.] – М.: СПО ОРГРЭС, 1998. – 13 с.

39 Del Pozo, M.D. Field measurements and modeling of high frequency transients during disconnect switch operations in EHV Substations. Assessment of their effects on Current Transformers / M.D. del Pozo, D.A. Esteban [и др.] // Proceed. of the 43rd CIGRE Session, Paris, 2010. – Paper A3 – 207. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

40 Riechert, U. Very fast transient overvoltages during switching of bus-charging currents by 1100 kV disconnecter / U. Riechert, U. Krüsi, D. Sologuren-Sanchez // Proceedings of the 43rd CIGRE Session, Paris, 2010. – Paper A3 – 107.– [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

41 Szewczyk, M. Impact of disconnecter design on very fast transient overvoltages in gas-insulated UHV switchgear / M. Szewczyk, W. Piasecki [и др.] //

Proc. of 17th Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August, 2011. – Paper B-013. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

42 CIGRÉ Working Group 15.03. GIS Insulation Properties in Case of VFT and DC Stress // Proceedings of the 36th CIGRÉ Session, Aug. 25 to 31, 1996, Paris, France. – Report 15 – 201. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

43 Liangeng, B. Estimation of VFTO for GIS and HGIS of China 1000 kV UHV pilot project and its suppressing countermeasures / B. Liangeng, X. Zutao // Proc. of the IEC/CIGRÉ UHV Symposium, Beijing, China, July 18 – 21, 2007. – Paper 2-3-4. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

44 Johansson, K. Modeling and Measurements of VFT Properties of a Transformer to GIS Bushing / K. Johansson, U. Gäfvert [и др.] // Proceedings of the 43rd CIGRE Session, Paris, 2010. – Paper A2 – 302. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

45 Беляев, С.Г. Резонансные явления в высоковольтных вводах с твёрдой полимерной изоляцией / С.Г. Беляев, Ю.Н. Львов, С.Г. Радковский // Электрические станции. – 2013. – №1. – С. 44 – 48.

46 Riechert, U. Mitigation of Very Fast Transient Overvoltages in Gas Insulated UHV Substations / U. Riechert, M. Bösch [и др.] // Proceedings of the 44th CIGRE Session, Paris, 2012. – Paper A3 – 110. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

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

48 Илюшов, Н.Я. Эффективное средство защиты электрооборудования от высокочастотных перенапряжений / Н.Я. Илюшов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 4. – С. 18 – 24.

49 Burow, S. Can ferrite materials or resonant arrangements reduce the amplitudes of VFTO in GIS? / S. Burow, S. Tenbohlen [и др.] // Proc. of 17th Intern. Symp.on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August, 2011. – Paper B-035. –[Электронный ресурс].– 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

50 РД 34.45-51.300 – 97 Объем и нормы испытаний электрооборудования / под общей редакцией Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца. – 6-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 1998. – 256 с.

51 Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования . – М.: ОРГРЭС, 1998. – 493 с.

52 Сви, П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения / П.М. Сви. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 128 с.

53 Дудкин, С.М.Измерение влажности трансформаторного масла. Учебное пособие / С.М. Дудкин, А.Е. Монастырский [и др.]. // – С.-Петербург: ПЭИПК, 2002. – 36 с.

54 Афонин, А.В. Излучения в инфракрасном диапазоне волн и их измерения /А.В. Афонин, А.И. Таджикибаев, В.В. Титков. // – СПб: ПЭПК, 2007. – 120 с.

55 ГОСТ 20074 –83 Электрооборудование и изоляция на напряжение свыше 1000 В. Методы измерения характеристик частичных разрядов. – М.: Госстандарт. – 1983. – 25 с.

56 Кучинский, Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский // – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.

57 Пинталь, Ю.С. О механизме развития начальных частичных разрядов в бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа / Ю.С. Пинталь, С.М. Шахгеданова // Сб. докладов н.-т. конф. «Повышение надежности энергосистем». – Иваново: ИвЭИ, 1978. – С.124 – 126.

- 58 Пинталь, Ю.С. Исследование начальных частичных разрядов в бумажно-масляной изоляции со слабо неоднородным электрическим полем [Текст] / Ю.С. Пинталь, С.М. Шахгеданова [ и др.] // Труды МЭИ. –1980. – вып. 447. – С. 86 – 92.
- 59 Van Brunt, R. J. Physics and chemistry of PD and corona – recent advances and future challenges / R. J Van Brunt // Conf. Elec. Insul. And Dielec. Phenom., Arlington, Tex., Oct. 23 – 26, 1994: Annu. Rept. – New York, 1994. – pp. 29 – 70.
- 60 Van Brunt, R. J. Stochastic properties of PD phenomena / R. J Van Brunt // IEEE Trans. Elec. Insul. – 1991. – 26. Vol. 5. – pp. 902 – 948.
- 61 Kreuger, F.H. Classification of PD / F.H. Kreuger, E. Gulski, A. Krivda // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1993. – V. 28. – N 6. – pp. 917– 931.
- 62 Измерительные трансформаторы. Часть 4. Измерение частичных разрядов. Стандарт МЭК 44 – 4. Издание первое. – Женева: МЭК,1980. – 10 с.
- 63 Беляевский, О.А. Контроль изоляции вводов и трансформаторов тока по характеристикам частичных разрядов системой СКИ –2 / О.А. Беляевский, В.Р. Бельцер [и др.] // В сб. н.-пр. семинара "Современное состояние и проблемы диагностики мощных силовых трансформаторов и реакторов", 8-10 февраля 2000 г. – Екатеринбург: Координационный совет по диагностике оборудования ОЭС «Уралэнерго». – 2000. – Бюллетень № 10.
- 64 Allan, D. Insulation failures and dielectric diagnostics; practices and challenges in the Australian region / D. Allan, J. Diesendorf [и др.] // Proc. of the 36th CIGRE Session. – Paris. – 1996.– Paper 15/21/33 – 04.– [Электронный ресурс].– 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).
- 65 Allan, D. Recent advances in automated insulation monitoring systems, diagnostic techniques and sensor technology in Australia / D. Allan, T. Blackburn [и др.] // Proc. of the 37th CIGRE Session. – Paris. – 1998.– Paper 15 –101. – [Электронный ресурс].– 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

- 66 Бажанов, С.А. Техническое обслуживание и ремонт вводов и изоляторов высокого напряжения / С.А. Бажанов // – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
- 67 Гречко, О.Н. Разработка системы диагностики ТТ на основе длительных испытаний и опыта эксплуатации /О.Н. Гречко, А.Ф. Курбатова, В.В. Соколов // Известия РАН. Сер. Энергетика. – 2000. – 4. – С.44 – 54.
- 68 Kurbatova, A.F. Development of diagnostic system of 330 -750 kV current transformer based on service experiences and endurance tests / A.F. Kurbatova, O.N. Grechko [и др.] // Proc. of the 37th CIGRE Session, Paris, 1998. – Paper 12 – 107. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).
- 69 Арбузов, Р.С. Нормы телевизионного контроля электрооборудования. Предложения по корректировке / Р.С.Арбузов, А.Г. Овсянников // Новости электротехники. – 2007. – № 6. – С. 60 – 62.
- 70 Lavrov, V. The distance inspection of oil-field high-voltage equipment by means of electromagnetic radiation / V. Lavrov // Proceedings of 14th International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, August 25-29, 2005. – Paper B – 46. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).
- 71 Алпатов, М.Е. Диагностика технического состояния высоковольтного оборудования на основе регистрации электромагнитных излучений [Текст] / М.Е. Алпатов, Д.Д. Загоскин [и др.] // ЭЛЕКТРО. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2006. – № 5. – С.6–9.
- 72 McGrail, T. Asset management: power transformer fleet condition assessment and risk management / T. McGrail, K. Elkinson // Proc. of 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul, Korea, August, 2013. – Paper OG1 – 02. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).
- 73 Moreau, C. Monitoring high voltage instrument transformers on site by partial discharge analysis [Текст] / С. Moreau // LAB echo. – 1996. – N 3. – С. 4.

74 Schwabe, R.J. On-line diagnostics of oil paper insulated instrument transformers /R.J. Schwabe, B. Whitcomb [и др.] // Proc. of the 38th CIGRE Session. – Paris. – 2000.– Paper 12/33 – 03.– [Электронный ресурс].– 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

75 Ovsyannikov, A. Estimation problems of insulation condition at PD intensity measurement [Текст] / A. Ovsyannikov // Proc. of the CIGRE SC 33 Conference, Prague, September 7th – 8th, 2000. – Paper S4 – 4.

76 Овсянников, А.Г. Оценка состояния изоляции оборудования по интенсивности частичных разрядов / А.Г. Овсянников // Энергетик. – 2001. –№ 5. – С. 35 – 37.

77 Овсянников, А.Г. Изоляция конденсаторного типа. Диагностирование по характеристикам частичных разрядов / А.Г. Овсянников, Е.А. Марюшко // Новости электротехники. – 2015. – № 5. – С. 43 – 45.

78 Арбузов, Р.С. Проблемы эксплуатации и диагностирования некоторых видов электрооборудования / Р.С. Арбузов, С.В. Живодерников [и др.] // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 2. – С. 51 – 56.

79 СО 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – М.: РАО «ЕЭС России», 2000. – 41 с.

80 Липштейн, Р.А. Трансформаторное масло / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

81 Липштейн, Р.А. Шведские трансформаторные масла фирмы "Nynas" марок Nitro 11GX и Nitro 10X / Р.А. Липштейн, Т.В. Глазунова, Е.Е. Довгополый // Электрические станции. – 1998. – № 1. – С. 61 – 64.

82 Ванин, Б.В. Изменение свойств трансформаторного масла Т-750 в высоковольтных герметичных вводах в процессе эксплуатации / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов Ю.Н. [и др.] // Электрические станции. – 1995.– № 3. – С. 27 – 34.

83 Ванин, Б.В. Методологические аспекты оценки степени старения изоляции обмоток силовых трансформаторов по изменению степени полимеризации / Б.В. Ванин, Я.В. Ланкау [и др.] // Электрические станции. – 2001. – № 1. – С. 35 – 39.

84 Алексеев, Б.А. Продление срока службы силовых трансформаторов. Новые виды трансформаторного оборудования. Обзор материалов СИГРЭ –2002 / Б.А. Алексеев // Электрические станции. – 2003. – № 7. – С. 63 – 69.

85 Некрасов, В.Г. О качестве трансформаторных масел для высоковольтных вводов и их надежности / В.Г. Некрасов, С.Д. Кассихин [и др.] // Электрические станции. – 1996. – № 8. – С. 55 – 57.

86 Алексеев, Б.А. Контроль влажности изоляции силовых трансформаторов. Использование поляризационных явлений / Б.А. Алексеев // Электрические станции. – 2004.– № 2. – С. 57 – 63.

87 Ванин, Б.В. О нормировании концентрации растворенных газов и мутности масла для выявления дефектов высоковольтных вводов / Ванин Б.В., Львов Ю.Н. [и др.] // Электрические станции, 2000– № 2. – С.52 – 55.

88 Львов, М.Ю. Коллоидно-дисперсные процессы в высоковольтных герметичных вводах трансформаторов / М.Ю. Львов // Электрические станции. – 2000– № 4. – С.49 – 52.

89 Львов, М.Ю. Применение оптической мутности масла для оценки состояния высоковольтных герметичных вводов трансформаторов / М.Ю. Львов // Электрические станции. – 1999. – № 6. – С. 60 – 63.

90 Львов, М.Ю. Нормирование показателей для оценки износа изоляции обмоток силовых трансформаторов / М.Ю. Львов, М.И. Чичинский [и др.] // Электрические станции. – 2002. – № 7. – С.51 – 54.

91 Ванин, Б.В. Эксплуатация силовых трансформаторов при достижении предельно допустимых показателей износа изоляции обмоток / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов [и др.] // Электрические станции, 2004. – № 2. – С.63 – 69.

92 Ванин, Б.В. Показатели состояния изоляции для оценки возникновения внутренних коротких замыканий в силовых трансформаторах / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов [и др.] // Электрические станции. – 2003. – № 2. – С.65 – 69.

93 Попов, А.А. Окисление ориентированных и напряженных полимеров / А.А. Попов, И.Я. Рапопорт, Г.Е. Заиков //– М.: Химия, 1987.– 232 с.

94 Рогинский, В.А. Фенольные антиоксиданты / В.А. Рогинский // – М.: Наука, 1988. –247 с.

95 Черножуков, Н.И. Окисляемость минеральных масел /Н.И. Черножуков, С.Э. Крейн // – М.: Гостоптеиздат, 1959. – 416 с.

96 Эмануэль, Н.М. Цепные реакции окисления углеводородов в жидкой фазе / Н.М. Эмануэль, Е.Т. Денисов, З.К. Майзус //– М.: Наука, 1965.– 373 с.

97 Sirimevan, K.W. Mechanisms of antioxidant action: the reaction of hindered phenols with rubber in the presence of free radicals / K.W. Sirimevan, G. Skott // European Polimer Jornal. – 1978. – vol.14. – С. 835 – 843.

98 Lokhanin, A.K. Internal insulation failure mechanisms of HV equipment under service conditions / A.K. Lokhanin, G.Y. Shneider, V.V. Sokolov // Proc. of the 39thCIGRE session, Paris, 2002. –Paper 15-201. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

99 Евсеев, Ю.А. О причинах повреждаемости высоковольтных герметичных вводов с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа /

Ю.А. Евсеев С.Д. Кассихин [и др.] // Электрические станции. – 1989. – № 1. – С.67 – 72.

100 Львов, Ю.Н. Количественная оценка содержания фурановых веществ и присадки ионов в изоляционных маслах / Ю.Н. Львов, Я.В. Ланкау [и др.] // Электрические станции. – 1998. – № 1. – С.59 – 60.

101 Долин, А.П. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов / А.П. Долин, Н.Ф. Першина, В.В. Смекалов // Электрические станции. – 2000. – № 6. – С. 46– 52.

102 Программа МАЭС для численного моделирования сложных электроэнергетических схем. Руководство пользователя. – Новосибирск, СибНИИЭ, 2006. – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610081. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

103 Кочура, Д.В. Обеспечение отключающей способности элегазовых выключателей при коммутации компенсированных линий электропередачи / Д.В. Кочура, И.Е. Наумкин, Л.И. Сарин // Энергетик. – 2016. – № 9. – С. 30 – 33.

104 Казицына, Л.А. Применение УФ-, ИК-, и ЯМР-спектроскопии в органической химии / Л.А. Казицына, Н.Б. Куплетская // – М.: Высшая школа, 1971. – 264 с.

105 Калабин, Г.А. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки / Г.А. Калабин, Л.В. Каницкая, Д.Ф. Кушнарев // – М.: Химия, 2000. – 408 с.

106 Кусаков, М.М. Ультрафиолетовые спектры поглощения ароматических углеводов / М.М. Кусаков, Н.А. Шиманенко, М.В. Шишкина // – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 271с.

107 Гордон, А. Спутник химика / А. Гордон, Р. Форд // – М.: Мир, 1976. – 538 с.

108 Белами, Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Белами // – М.: Химия, 1963.

109 Писарева, С.И. Определение антиоксиданта ионола (2,6-дитребутил-4-метил-фенола) в трансформаторных маслах кинетическим методом и методом ИК-спектроскопии / С.И. Писарева, В.И. Пынченков [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2001. – том 56. – № 10. – С. 1106 – 1109.

110 Ovsyannikov, A.G. The Influence of High Frequency Overvoltages on Current Transformers / A.G. Ovsyannikov, A.A. Tsarikovsky // Proceed. of the 14th International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China: Tsinghua University. – 2005. –Paper B – 41. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

111 Овсянников, А.Г. Влияние высокочастотных перенапряжений на трансформаторы тока / А. Г. Овсянников, А.А. Цариковский // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Выпуск № 28: «Качество и надёжность эксплуатации электрических коммутационных аппаратов. Современное состояние проблемы оценки технико-экономической эффективности систем (методов и средств) диагностирования электрооборудования. Общие проблемы диагностики силового электрооборудования» / Под.ред. А. И. Таджибаева, В. Н. Осотова. – С.-Пб.: ПЭИПК, 2005. – С. 267 – 276.

112 Фомина, И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения / И.А. Фомина // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, том 1, Томск, апрель 2010. – С. 134 – 135.

113 Фомина, И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения / И.А. Фомина // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование,

ремонт и продление срока службы: материалы Международной н.-практ. конф., Екатеринбург, сентябрь 2010. – С. 199 – 205.

114 Фомина, И.А. Моделирование электромагнитных переходных процессов в трансформаторах тока ИМВ 550 / И.А. Фомина, А.Г. Овсянников, С.В. Горелов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.– № 1–2.– 2014. – С. 246 – 252.

115 Фомина, И.А. Воздействия коммутационных напряжений на ТТ сверхвысокого напряжения / И.А.Фомина // Электроэнергетика: сегодня и завтра. – 2013. – № 3. – С.48 – 52.

116 Овсянников, А. Г. Частотные и переходные характеристики вводов и трансформаторов тока с изоляцией конденсаторного типа / А. Г. Овсянников, И.А. Фомина // Диагностика электрических установок : материалы 8 н.-практ. семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок «Проблемы 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. – Новосибирск: СибПРИНТ, 2013. – С. 46–52.

117 Фомина, И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения и результаты химического анализа трансформаторного масла / И.А. Фомина // Сборник научных трудов НГТУ.– 2010. – № 4. – С. 155 – 160.

118 Фомина, И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения и результаты химического анализа трансформаторного масла / И.А. Фомина // Электрическая изоляция – 2010: сборник научных трудов пятой Международной н.-техн. конференции, Санкт-Петербург, июнь 2010.– С. 213 – 219.

- 119 Фомина, И.А. Внутренние резонансные процессы в трансформаторе тока  
IMB 550 / А.Г. Овсянников, С.С. Шевченко // Новое в российской  
электроэнергетике, №2, 2017. – С. 45 – 56.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Письмо ФСК

Центр инжиниринга  
и управления строительством



Единой  
Энергетической Системы

ЦНЭС Северо-Запад филиал ОАО «ФСК ЕЭС»  
Росинв. 660071, Удмуртский край  
г. Ижевск, пр. Троицкий, д. 23  
тел. (391) 274-61 00, факс (391) 274-61 67  
e-mail: cns@fscs.ru

05.05.2012

№

40/3/228

По списку рассылки

О приостановке действия ЗАК на ТТ  
типа IMB производства фирмы ABB

Уважаемые Господа!

В соответствии с письмом ОАО «ФСК ЕЭС» от 24.04.2012 № ЧВ-3519 сообщаем Вам, что ОАО «ФСК ЕЭС» приняты следующие решения:

1. Приостановить действие Заключения аттестационной комиссии на трансформаторы тока серии IMB для применения в сетях переменного тока с номинальным напряжением 110-500 кВ от 02.07.2007 № 12 и исключить применение трансформаторов тока типа IMB, производства фирмы ABB в проектах нового строительства и реконструкции;

2. Решение о снятии запрета на применение измерительных трансформаторов тока типа IMB производства фирмы ABB в проектах нового строительства и реконструкции будет принято после выяснения и устранения фирмой ABB причин повреждений трансформаторов тока с согласованием филиалов ОАО «ФСК ЕЭС» МЭС Северо-Запада и МЭС Сибири.

Вышеуказанные решения Вам необходимо приять для руководства в работе.

- Приложение:
1. Список рассылки на 2 л, в 1 экз.
  2. Письмо ОАО «ФСК ЕЭС» от 24.04.2012 № ЧВ-3519 о приостановке действия ЗАК на трансформаторы тока типа IMB производства фирмы ABB на 9 л, в 1 экз.

Главный инженер

А.У. Кузнецов

М.В. Сериков  
(391) 2 746 700 (6852)

4В-3519  
23.04.2012

В соответствии со списком  
рассылки

О приостановке действия ЗАК  
на трансформаторы тока типа IMB  
производства фирмы АВВ

Уважаемые коллеги!

За период времени 2010-2012 гг. на объектах ОАО «ФСК ЕЭС» произошло четыре технологических нарушения, связанных с повреждением измерительных трансформаторов тока типа IMB, производства фирмы АВВ (Швеция).

Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» МЭС Северо-Запада письмом от 27.03.2012 № М7/1/145 (приложение 1) обратилось в ОАО «ФСК ЕЭС» по вопросу приостановки действия Заключения аттестационной комиссии на трансформаторы тока серии IMB для применения в сетях переменного тока с номинальным напряжением 110-500 кВ № 12 (дата выдачи – 02.07.2007). При этом в письме указаны случаи повреждения измерительных трансформаторов тока типа IMB-362 на ПС 330 кВ «Восточная» в апреле 2010 г. и на ПС 330 кВ «Западная» в марте 2012 г.

Кроме того, на объектах филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Сибири в ноябре 2010-2011 гг. (ПС 500 кВ «Таврическая» и «Иртышская») (приложение 2) соответственно произошли технологические нарушения в работе трансформаторов тока типа IMB-550. При этом официального заключения от завода-изготовителя по причинам повреждения трансформаторов тока и выдачи рекомендаций по возможности дальнейшей эксплуатации данного оборудования до настоящего времени в ОАО «ФСК ЕЭС» не поступало.

Анализ повреждаемости трансформаторов тока за период 2010-2012 гг. выявил достаточно высокий процент отказов трансформаторов тока типа IMB по отношению к общему числу отказов измерительных трансформаторов тока.

В связи с этим, ОАО «ФСК ЕЭС» принимает решение:

1. Приостановить действие Заключения аттестационной комиссии на трансформаторы тока серии IMB для применения в сетях переменного тока с номинальным напряжением 110-500 кВ от 02.07.2007 № 12 и исключить применение трансформаторов тока типа IMB, производства фирмы АВВ в проектах нового строительства и реконструкции;

2. Решение о снятии запрета на применение измерительных трансформаторов тока типа IMB производства фирмы ABB в проектах нового строительства и реконструкции будет принято после выяснения и устранения фирмой ABB причин повреждений трансформаторов тока с согласованием филиалов ОАО «ФСК ЕЭС» МЭС Северо-Запада и МЭС Сибири.

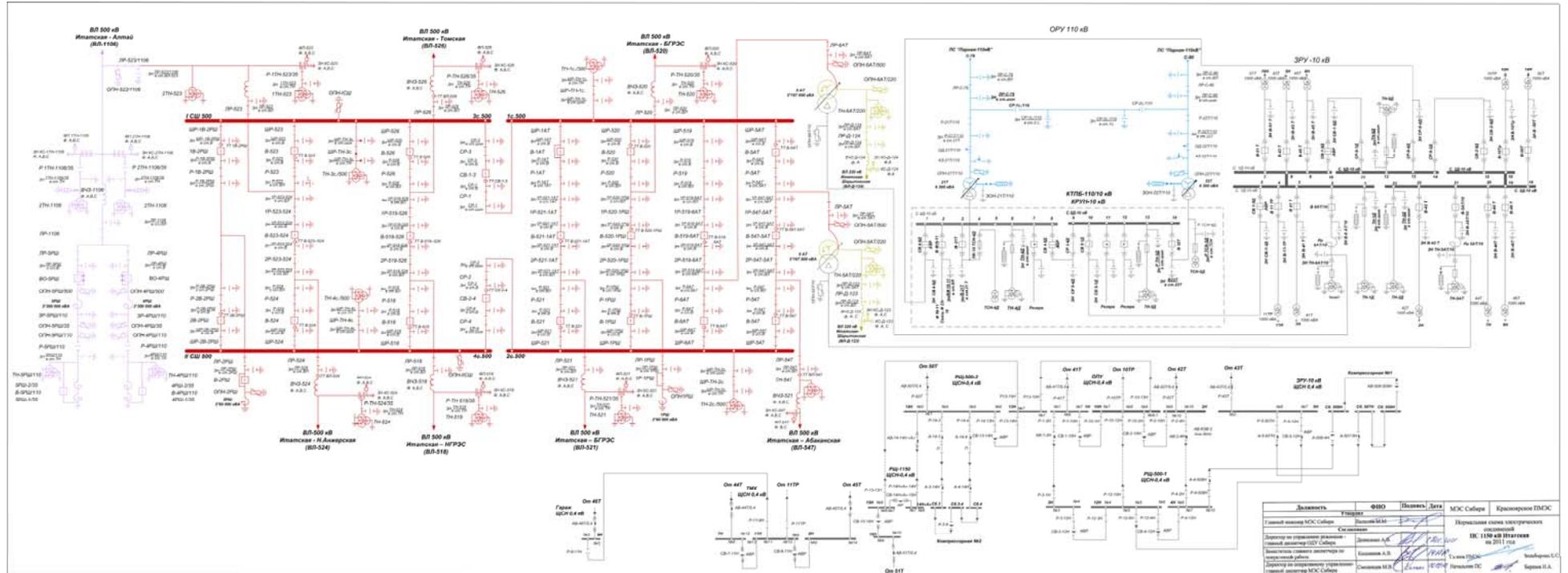
Приложение: 1. Письмо МЭС Северо-Запада от 27.03.2012 № М7/1/145 на 1 л. в 1 экз.  
2. Акт № 8 от 07.12.2011 на 5 л. в 1 экз.

Первый заместитель  
Председателя Правления

В.Н. Чистяков

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Электрическая схема ПС «Итатская-1150 кВ»



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Акты внедрения

**УТВЕРЖДАЮ**


  
 Директор Новосибирской СПБ филиала  
 ОАО «ФСК ЕЭС» – Электросетьсервис,  
 к.т.н.

Р.С. Арбузов

#### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Фоминой Ирины Александровны на тему «Исследование коммутационных перенапряжений и старения изоляции в измерительных трансформаторах тока сверхвысокого напряжения»

гор. Новосибирск

30 мая 2013 г.

- Диссертационная работа Фоминой И.А. рассмотрена комиссией в составе:
1. Председатель: Живодерников С.В. – начальник службы организации диагностики маслонаполненного оборудования, к.т.н.
  2. Член комиссии – ведущий инженер Аникеева М.А.
  3. Член комиссии: Масленников А.Л. – начальник планового отдела.

Комиссия рассмотрела выводы и рекомендации диссертации Фоминой И.А., представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Комиссия пришла к следующим выводам:

1 Результаты исследований, проведённых Фоминой И.А., доказывают, что характеристика трансформаторного масла «перекисное число» действительно обладает наибольшей чувствительностью к процессам деградации и окисления масла и должна быть введена в объём проводимых химической лабораторией испытаний проб масла.

2 Использование предложенной характеристики даст экономический эффект за счёт отказа от дорогостоящей и небезопасной стандартной методики оценки окислительной стойкости масла. По предварительным оценкам эффект может составить от 48 до 87 тыс. руб. в год в зависимости от объёма анализов проб масла в лаборатории.

Председатель комиссии  
 Член комиссии  
 Член комиссии



С.В. Живодерников  
 М.А. Аникеева  
 А.Л. Масленников

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе НГТУ,

Заслуженный деятель науки РФ,

д.т.н., профессор Вострецов А.Г.



« 22 » августа 2016 г.

**Акт внедрения**

Результаты диссертационной работы Фоминой Ирины Александровны внедрены в учебный процесс на кафедре техники и электрофизики высоких напряжений факультета энергетики НГТУ.

*Предмет внедрения*

1. Программа для ЭВМ «Исследование распределения напряжения по слоям и вдоль обмотки трансформатора тока».
2. Использование физической модели в высоковольтном зале для «Исследования распределения напряжения по слоям и вдоль обмотки трансформатора тока».

*Характер внедрения*

1. Использование программы студентами и аспирантами при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалифицированных работ.
2. Использование алгоритмов в НИР кафедры при исследовании коммутационных перенапряжений в высоковольтном оборудовании.

к.э.н., доцент  
декан факультета энергетики

Чернов Сергей Сергеевич