

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор **Овсянников Александр Георгиевич**

Официальные оппоненты: **Дарьян Леонид Альбертович**,
доктор технических наук, Акционерное общество «Инспекция по контролю технического состояния объектов электроэнергетики», директор по научно-техническому сопровождению

Наумкин Иван Егорович, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Болид», заместитель директора по науке

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита состоится: «15» июня 2017 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=16261.

Автореферат разослан «___» апрель 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А. Г. Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности.

Отечественная электроэнергетика вплотную подошла к необходимости радикального технического перевооружения парка высоковольтного электрооборудования. Старое оборудование заменяется новым, в том числе, импортным. Внедрение зарубежного электрооборудования должно осуществляться при условии их 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. В частности было установлено (Л.А. Дарьян, С.М. Коробейников), что первопричиной отказов ТТ типа ИМВ 550, установленных на подстанции «Итатская – 1150 кВ», было механическое повреждение сильфонов, предназначенных для компенсации температурного расширения масла. После замены сильфонов и доливки масла отказы ТТ этого типа 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. Одной из возможных причин отказов ТТ могли быть высокочастотные перенапряжения, сопровождающие коммутации шин распределительных устройств разъединителями. Было предположено, что коммутационные перенапряжения, сами по себе опасные для изоляции и повышенной амплитудой, и высокой частотой, могут, также возбуждать в первичной обмотке свободные колебания с резонансной частотой. Особенность конструкции ТТ ИМВ 550, состоит в том, что первичная обмотка 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 колебания резонансной частоты, вызывающие ускоренное старение изоляции ТТ.

Сложившаяся ситуация придала новый импульс совершенствованию профилактических испытаний изоляции ТТ. Большую роль в этом направлении сыграли работы ОРГРЭС, ВЭИ, ВНИИЭ, СибНИИЭ, ЗТЗ-Сервис и их сотрудников: 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 и др. Однако поиск новых методов контроля изоляции ТТ и её компонентов продолжается.

Таким образом, выявление причин и предупреждение отказов ТТ играет важную роль в обеспечении нормального функционирования процесса генерации и передачи электрической энергии. Поэтому исследования, направленные на реше-

ние указанных проблем, сохраняют свою **актуальность**.

Объектами исследования выбраны трансформаторы тока ИМВ 550.

Предметом исследования являются коммутационные перенапряжения и методы диагностирования изоляции первичной обмотки.

Целью работы является исследование внутренних перенапряжений с частотой резонанса напряжения и старения изоляции трансформаторов тока при их воздействии.

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

- ~ 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, а также 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 установлен факт образования резонанса напряжений в первичной обмотке трансформатора тока класса напряжения 500 кВ при коммутациях разъединителем шин присоединения.
- 2 В результате итерации экспериментальных и расчетных процедур разработана адекватная математическая модель первичной обмотки и обкладок изоляции конденсаторного типа трансформатора тока.
- 3 Установлено, что резонансное перенапряжение максимальной амплитуды формируется в средней части обмотки и в первом слое изоляции. Случайный пробой одного из слоёв изоляции с закороткой двух обкладок в одной точке мо-

жет привести к непропорциональному увеличению напряжения на оставшихся слоях изоляции.

4 Установлен механизм образования и состав X – воска. В основе механизма стеклования масла лежат процессы оксигенации радикальных групп, концентрация которых в масле марки Nitro 11GX в три раза больше, чем в масле марки ГК.

Положения, выносимые на защиту:

1 Коммутации разъединителями генерируют высокочастотные перенапряжения на шинах распределительного устройства. Воздействуя на трансформатор тока, перенапряжения могут вызвать внутренние резонансные процессы, которые проявляются в виде слабо затухающих колебаний тока с несколькими резонансными частотами.

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

3 Масло Nitro 11GX отличается высоким содержанием ароматических соединений (нафтенон), и поэтому, при прочих равных условиях, его оксигенация происходит быстрее и с большей вероятностью образования X-воска, чем у масла ГК. Антиокислительная присадка ионол (агидол) при отрицательных температурах практически не работает, в то время как нафтены продолжают реагировать с кислородом и в этих условиях. Наиболее чувствительным показателем процесса окисления является перекисное число масла.

X-воск, выделяющийся при окислении масла Nitro 11GX на бумаге, состоит, в основном, из пероксидированных углеводородов (олигомерные производные углеводороды с перекисными и карбонильными группами) с молекулярной массой не менее 1500 а.е.м. и содержит до 4,4 % кислорода.

Теоретическая значимость работы заключается в демонстрации возможностей математического моделирования 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 феде-

ральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением в поверенных измерительных приборов 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 международн. н.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», г. Томск, апрель 2010; на 6-й конф. по диагностированию электроустановок, г. Пермь, март 2012; на 8-м н.-практ. 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.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и степень её разработанности, сформулирована цель, основные задачи и методы исследования, отражены научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** выполнен обзор различных конструкций трансформаторов тока, даны основные параметры и характеристики. Проведен анализ аварийности и выделены характерные причины повреждения. Более подробно рассмотрена конструкция и приведена хронология аварийности трансформаторов тока серии ИМВ на подстанциях ПАО «ФСК ЕЭС».

Выполнен анализ публикаций, посвящённых исследованиям высокочастотных перенапряжений и внутренних резонансов в подстанционном оборудовании. Рассмотрены требования нормативных документов к объёму и нормам профилактических испытаний оборудования с изоляцией конденсаторного типа, а также сведения о свойствах трансформаторных масел и методах их физико-химического анализа.

В **главе 2** рассматриваются переходные процессы при коммутациях разъединителями шин распределительных устройств, при которых возникают высокочастотные перенапряжения (ВЧП). Коммутации разъединителями характеризуются

многократными повторными зажиганиями дуги. Амплитуды, частоты и количество ВЧП зависят от характеристик коммутируемых цепей, типа разъединителя, конструкции его контактов и скорости движения, а также от метеорологических условий.

В «Методических указаниях по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше» (1998 г.) приведены расчётные оценки максимальных амплитуд и диапазонов частот ВЧП. В настоящей работе была проведена выборочная проверка, подтвердившая справедливость этих оценок. Амплитуда ВЧП может варьировать в диапазоне от сотен вольт до $3,5U_{фм}$, что уже представляет реальную угрозу для оборудования подстанции, в том числе для измерительных трансформаторов тока.

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

$$U_{np} < E_n - E_x. \quad (1)$$

где E_n и E_x – соответственно потенциалы питающей и холостой (коммутируемой) шин.

Зажигание дуги сопровождается высокочастотным колебательным процессом, вследствие перезарядки емкостей холостой, C_x , и питающей, C_n , шины. После пробоя максимальную амплитуду напряжения U_1 на емкости C_x можно определить по формуле:

$$U_1 = -(E_n - E_x) \cdot \cos(2\pi ft) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right), \quad (2)$$

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

Принимая во внимание подзарядку шин со стороны ВЛ и трансформаторов, переходной процесс может развиваться по двум вариантам.

Первый вариант, когда к питающим шинам подключено n линий с эквивалентным волновым сопротивлением $Z_g = Z / n$, то подзарядка емкостей шин происходит по экспоненциальному закону:

$$U_{2a} = -(E_n - E_x) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (3)$$

где τ_2 – постоянная времени, равная $Z_g \cdot (C_n + C_x)$ и имеющая порядок значений $(10^{-6} - 10^{-7})$ с.

Переходный процесс (3) практически заканчивается до наступления максимума ВЧ перенапряжения, а значение напряжения составит:

$$U = E_n + U_1 + U_{2a}. \quad (4)$$

Второй вариант развития переходного процесса будет иметь место, если гашение дуги произойдет после затухания высокочастотного переходного процесса. В момент гашения дуги на обеих шинах будет потенциал $U_n \leq U_{фм}$. Далее напряжение на холостой шине снижается по экспоненциальному закону

$$E_x = E_n \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right), \quad (5)$$

где τ_3 – постоянная времени, которая зависит от суммарной активной проводимости холостых шин на землю, $\tau_3 = C_x / G_x$.

На питающих шинах напряжение после погасания дуги изменяется с частотой 50 Гц. Процессы на шинах будут идти независимо до момента t , после разность потенциалов $E_{п1} - E_{x1}$ вновь превысит пробивное напряжение межконтактного промежутка разъединителя $U_{пр1}$. Промежуток пробивается, и цикл переходных процессов повторяется.

Главным фактором, влияющим на максимальное значение амплитуды является соотношение ёмкостей питающей и холостых шин. Наиболее неблагоприятным является случай $C_{п} < C_x$ (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 $(2 - 2,5) 2U_{фм}$.

Таким образом, для оценки реальных значений перенапряжений при коммутациях на подстанциях, следует шины моделировать линиями с распределёнными параметрами, с учетом реального расположения оборудования. Приближённая оценка ожидаемых амплитуд ВЧ перенапряжений может быть выполнена по эмпирическому выражению:

$$U_{вч} = K_y \cdot (U_{фм} - U_x) + E_x = K_y \cdot U_{пр} + E_x, \quad (6)$$

где K_y – ударный коэффициент U_x . $U_{пр} E_x$. Значения E_x и $U_{пр}$ рекомендованы в таблицах, рассмотренных методических указаниях.

Экспериментальные исследования перенапряжений и токов при коммутациях разъединителями ячеек с трансформаторами тока были проведены на ПС «Итатская». Временные характеристики переходного процесса хорошо прослеживаются на осциллограммах с высокой скоростью развертки (рисунок 1). В данном случае длительность фронта скачка напряжения составляла $T_{фр.U} = 0,4$ 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.

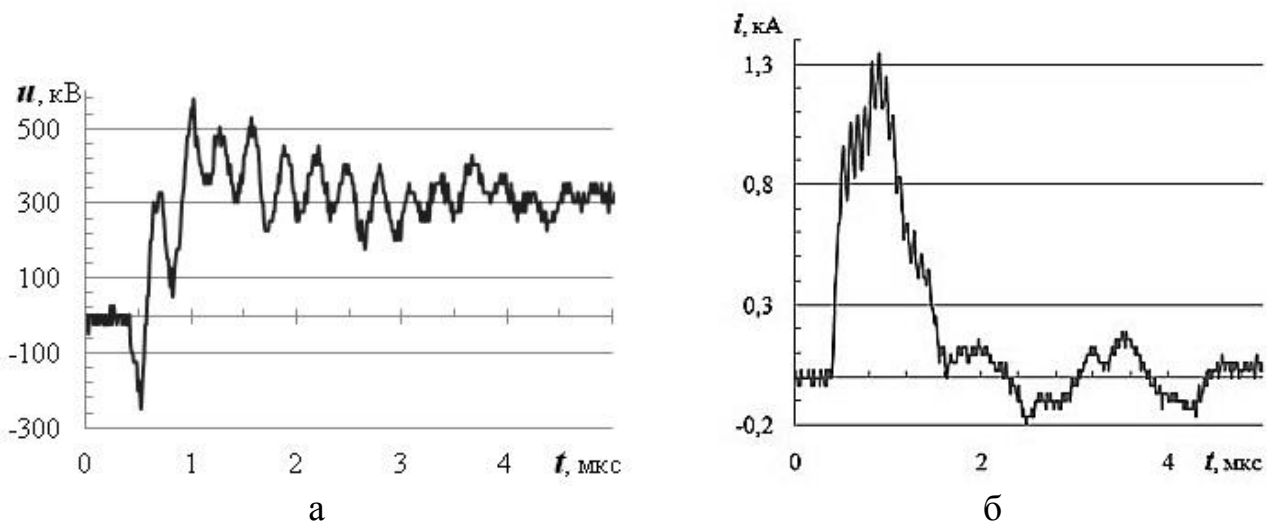


Рисунок 1 – Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) в завершающей стадии отключения разъединителя ШР 6АТ

Результаты измерений при коммутациях разъединителями в других ячейках по характеру были похожи. Каждая ступень напряжения соответствовала очередному пробую межконтактного промежутка разъединителя, при котором напряжение на ТТ изменялось скачком от некоторого начального значения до мгновенного значения напряжения на шинах ПС, соответствующем моменту пробоя.

Сводные данные по характеристиками перенапряжений и токов, соответствующие завершающей стадии отключения разъединителя со стороны ТТ, приведены в таблице 1. Как видно из приведённых данных, кратность перенапряжений была невелика. Однако резкие ступенчатые изменения напряжения на ТТ сопровождалось протеканием импульсного тока в цепи заземления нулевой обкладки, амплитуда которого достигала 1300 А. Негативные последствия от протекания тока могут быть связаны с увеличением активных потерь в изоляции, термическим и электродинамическим воздействиями на обкладки и контактные соединения.

Таблица 1 – Амплитудно-временные характеристики переходных процессов

Наименование характеристики	Значение
Напряжение ступени, кВ	270 – 460
Время нарастания напряжения на ступени, мкс	0,4 – 0,7
Амплитуда наложенных колебаний, кВ	< 50
Кратность перенапряжений по отношению к $U_{ф.м}$	< 1,3
Время между ступенями, мс	3,6 – 12,6
Амплитуда импульса тока на ступени, А	1180 – 1300

Коммутации разъединителя со стороны выключателя приводили к существенно меньшим перепадам напряжения (до 150 кВ) и импульсным токам (до 500 А). Однако неприятной отличительной особенностью этого режима являлось возникновение высокочастотных и относительно слабо затухающих колебаний тока с амплитудой ~300 А и частотой ~1,7 МГц. Эти колебания тока не отражались в осциллограммах напряжения, но, могли быть связаны с переходным процессом внутри самого трансформатора. Грубая оценка напряжения на изоляции ТТ по величине тока и емкости ТТ дала значение амплитуды ВЧ перенапряжений порядка 30 кВ.

В цифровой обработке сигналов использовалось вейвлет – преобразование. В качестве базисного взяли вейвлет Морле, так как он хорошо локализован и во временной, и в частотной областях сигнала

$$\psi(t) = \exp(iat - \frac{t^2}{2}), \quad (7)$$

где a - пересчитываемое значение его масштабирующей переменной.

Вещественную и мнимую части данного вейвлета $\psi(t)$ образуют амплитудно – модулированные колебания. 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, реа-

лизованного в пакете MATLAB, лежит процедура определения центральной частоты вейвлета, значение которой равно частоте гармоники, наилучшим образом аппроксимирующей его центральный всплеск. Частоты вейвлета определяются как

$$f_a = \frac{f_c}{a \cdot \Delta t}, \quad (8)$$

где f_a - псевдочастота вейвлета, Гц, Δt - шаг дискретизации, f_c - 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 анализе осциллограмм напряжения максимальная энергия прослеживалась при коэффициенте $a=145$ и $a=24$, что в переводе дает нам частоты 1,8 МГц и 8,4 МГц, соответственно.

Вейвлет-преобразование импульса тока показали, что максимальная энергия выделяется при коэффициентах $a=138$ (рисунок 2), $a=230$ и $a=6,5$, что в переводе дает частоты 1,9 МГц, 880 кГц и 33,0 МГц, соответственно.

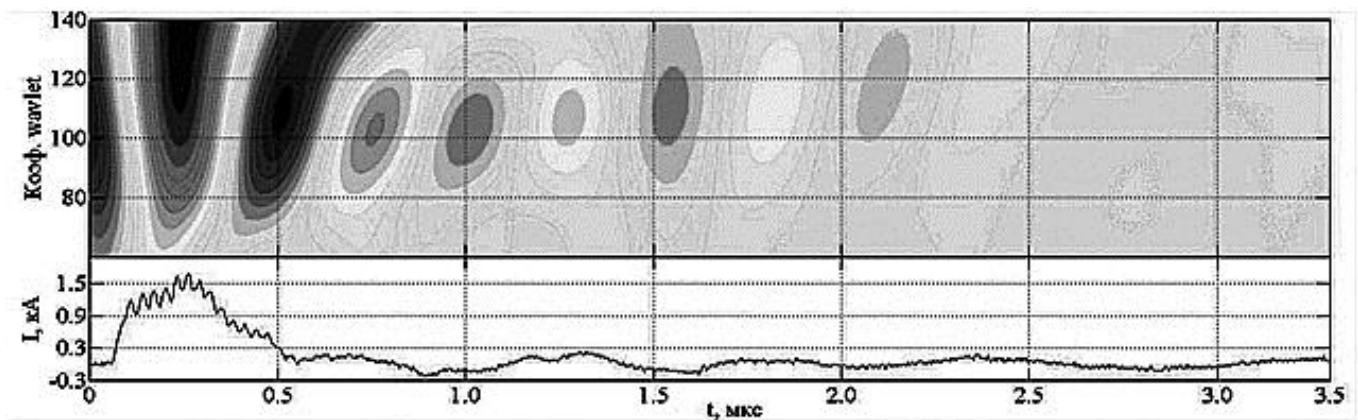


Рисунок 2 – Вейвлет-преобразование сигнала тока через изоляцию трансформатора тока при отключении разъединителя ШР 6АТ ($f=1,8$ МГц)

Заметим, что колебания с частотами 1,8 – 1,9 МГц содержатся и в напряжении, и в токе, что говорит о их принадлежности свободным колебаниям внутри трансформатора тока.

На реальном ТТ ИМВ 550 были проведены измерения частотных и переходных характеристик. По их результатам была синтезирована упрощенная эквивалентная схема первичной обмотки (рисунок 3) со следующими параметрами:

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

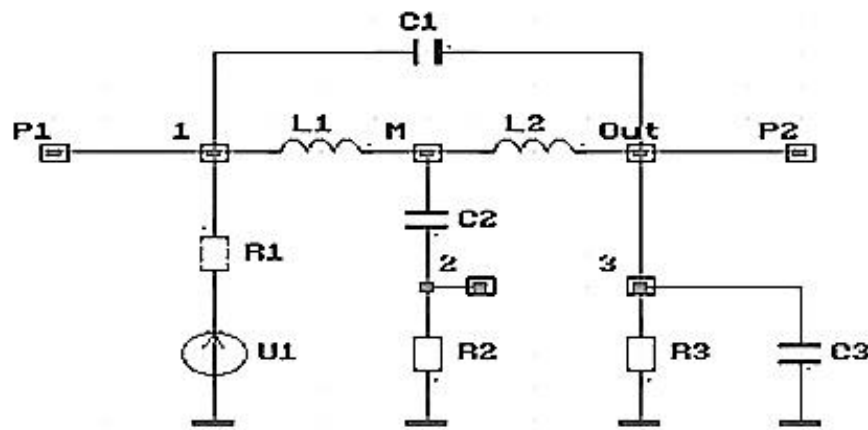


Рисунок 3 – Упрощенная схема замещения трансформатора тока

В упрощенной схеме замещения индуктивность первичной обмотки искусственно разделена пополам для того, чтобы включить в схему замещения ёмкость первичной обмотки на землю. Расчеты по программе «NL» показали хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение с измеренными сигналами на ПС «Итатская». Было подтверждено существование резонанса напряжения в последовательной цепи: «индуктивность – емкость» изоляции первичной обмотки с резонансной частотой 2,014 МГц. Экспериментально измеренное значение резонансной частоты (использовался генератор ГЗ-112, шунт с сопротивлением 4 Ом и цифровой осциллограф TDS 220) показали отличие от теоретической оценки.

На рисунке 4 приведена зависимость модуля входного сопротивления от частоты. Там же приведены результаты расчёта по упрощенной эквивалентной схеме.

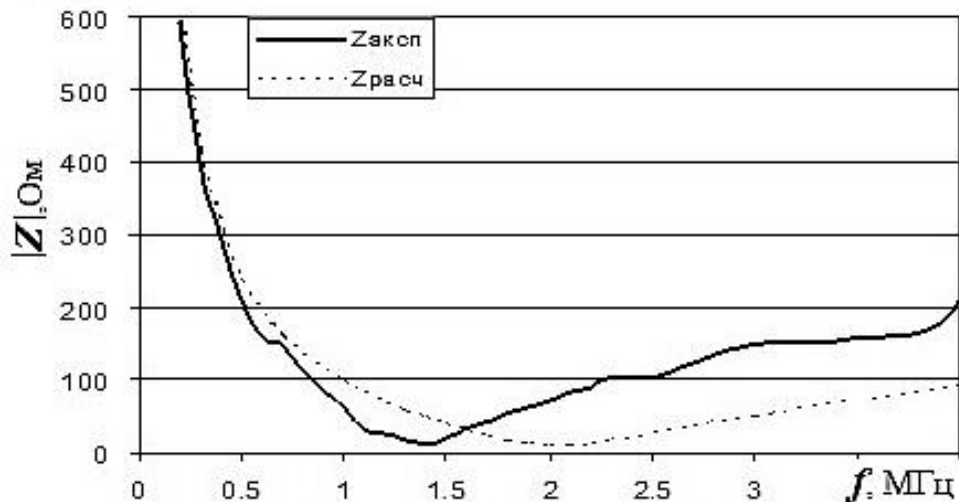


Рисунок 4 – Зависимость модуля входного сопротивления первичной обмотки от частоты

Различие экспериментальных и расчётных зависимостей связано с влиянием индуктивности 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.

Вейвлет преобразование импульса тока, полученной в измерениях переходной характеристики, показало, что максимальная энергия имеет место при коэффициенте $a=560$, что в пересчете дает резонансную частоту 1,4 МГц. Из рисунка 5 видно, что в спектре сигнала преобладает один единственный компонент с частотой 1.4 МГц. Никакие другие компоненты в осциллограмме тока не обнаружены.

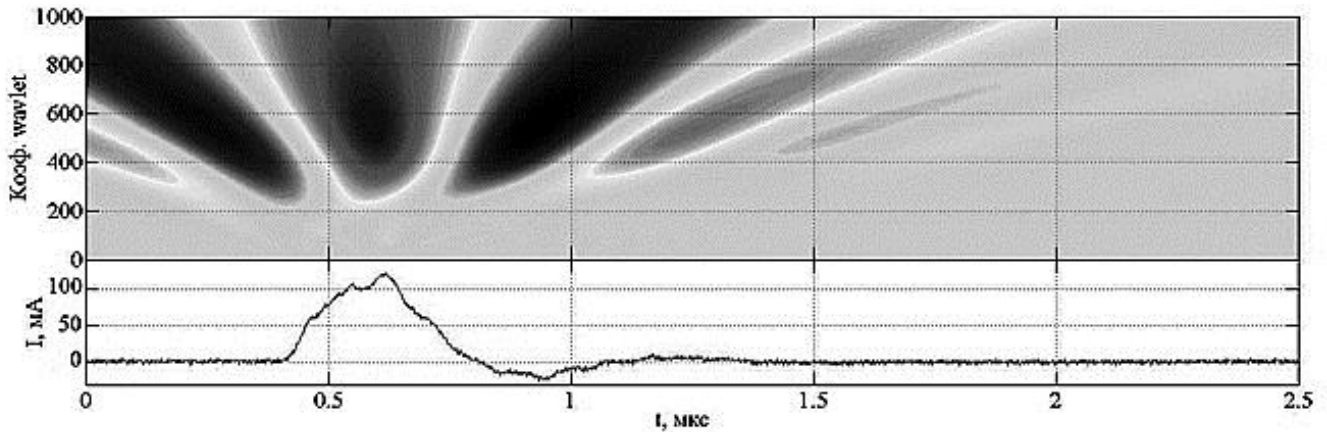


Рисунок 5 – Вейвлет – преобразование сигнала тока

Подытоживая результаты проведённых испытаний, можно считать доказанным возникновение высокочастотных и относительно слабо затухающих колебаний тока с несколькими резонансными частотами. Можно предположить, что эти колебания могут быть связаны с возбуждением свободных колебаний напряжения с частотой, соответствующей частоте резонанса напряжений внутри трансформатора тока. Резонанс напряжения, наличие которого прослеживается и в амплитудно-частотной характеристике, может проявлять себя именно так, что колебания напряжения на зажимах 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 напряжения на резонирующих элементах (индуктивность витка и ёмкость изоляции) могут превышать внешнее напряжение и вызывать ускоренное старение изоляции ТТ. Поэтому необходимо исследовать процессы в ТТ ИМВ 550 в области высоких частот и синтезировать полную схему замещения первичной обмотки, отражающую суть внутренних переходных процессов и адекватно описывающих распределение напряжения по слоям изоляции и по длине обкладок.

Глава 3 посвящена математическому и физическому моделированию 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 в области высоких частот можно представить в виде последовательных и параллельных цепочек сосредоточенных ёмкостей и индуктивностей.

Значения индуктивностей и ёмкостей в ячейках, получили исходя из упрощенного представления о равномерном распределении общей индуктивности и ёмкости слоев по длине витка и соответствующей обкладки. Составленная таким образом схема замещения приведена на рисунке 6. 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 емкость C , которые моделируют ошиновку, к которой подключен трансформатор тока. Источник $V1$ воспроизводит ступеньку напряжения, генерируемую при коммутациях разъединителей. Расчёт напряжений на изоляции вёлся в прикладном пакете Pspice.

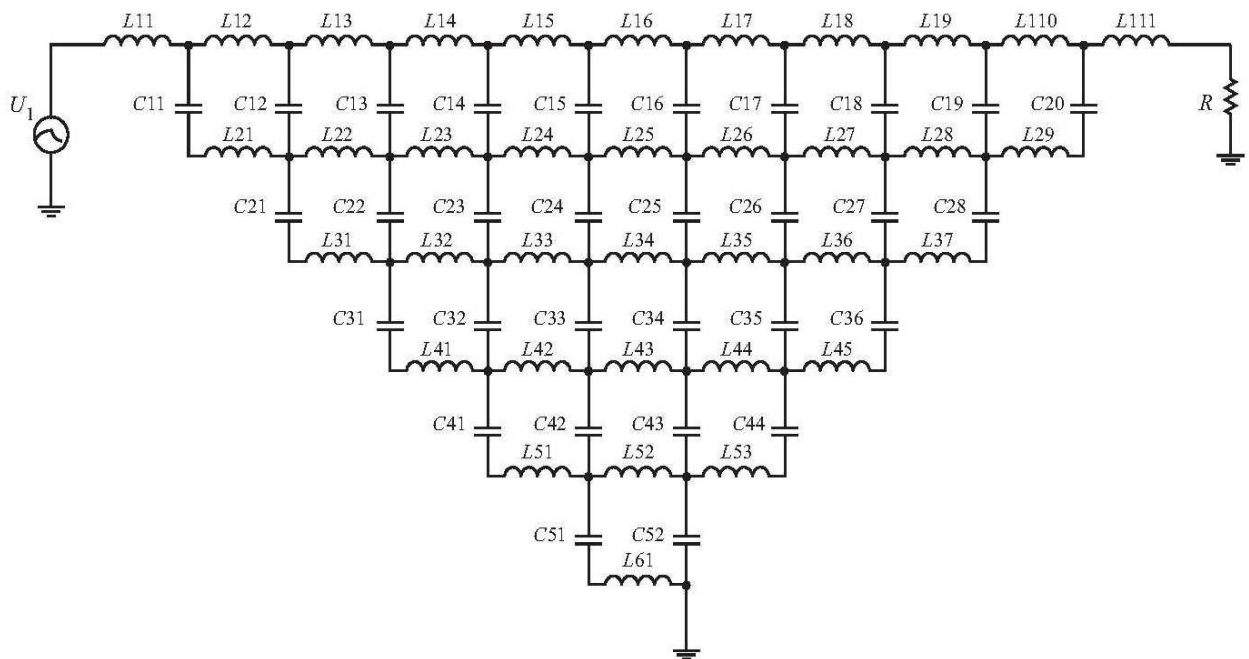


Рисунок 6 – Расчетная схема замещения трансформатора тока ИМВ 550

Для верификации разработанной математической модели было решено разработать макет обмотки ТТ ИМВ-550 (физическую модель) реальных размеров. Каркас витка первичной обмотки был изготовлен из деревянных брусков (рисунок 7,а).

В качестве материала для моделирования витка и обкладок использовалась полосовая медная лента толщиной 0,1 мм намотанная внахлест (рисунок 7,б). Изоляция выполнялась из поливинилхлоридной ленты с толщиной намотки в слое 1 мм. В результате моделирования получился макет витка первичной обмотки с наложенными на него четырьмя слоями изоляции и проводящими обкладками (рисунок 7,в). Для исследования распределения напряжения по длине обмотки и обкладок были сделаны 9×4 выводов. В макете были получены следующие параметры: ёмкость изоляции – 8,3 нФ; индуктивность – 5,3 мкГн.

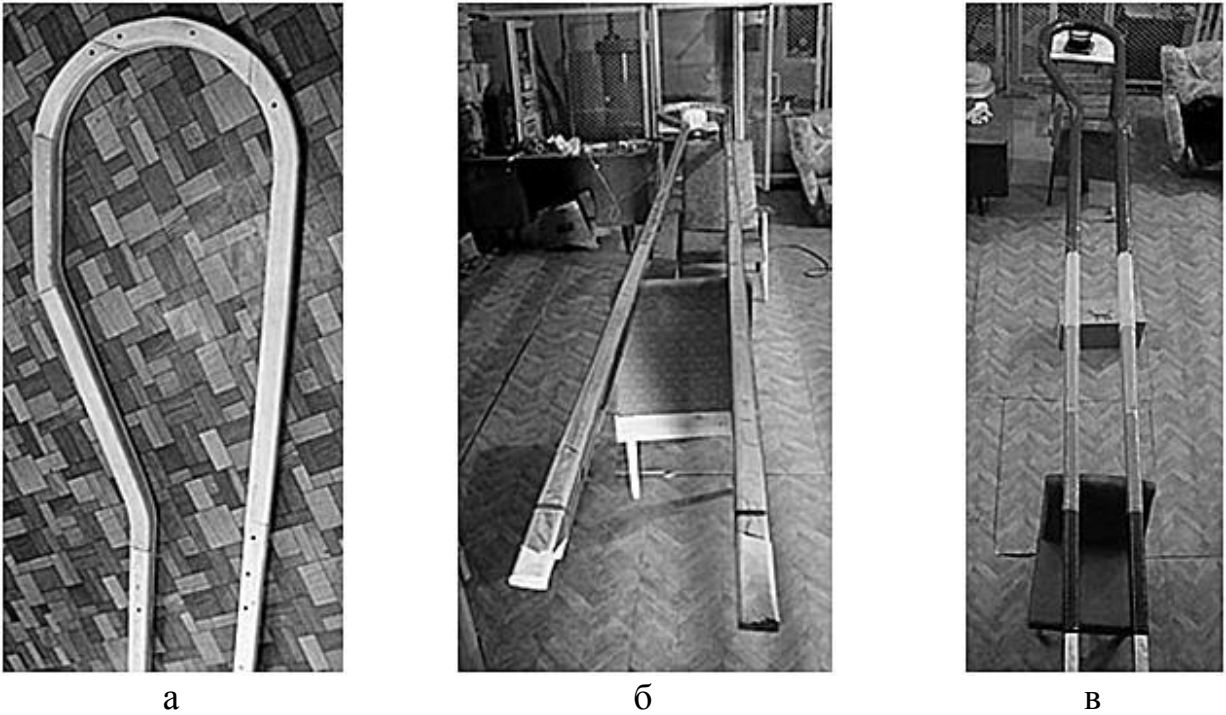


Рисунок 7 – Этапы изготовления макета: а – каркас макета витка; б – макет витка; в – готовый макет обмотки со слоями изоляции и отводами от обкладок

Суммарное значение индуктивности первичной обмотки трансформатора тока совпадает с измеренным значением, так как индуктивность главным образом зависит от длины. Значение емкости изоляции сильно отличается от реального значения, что связано с меньшей толщиной и большей диэлектрической проницаемости ленты ПВХ. Несмотря на различия физической модели от реального ТТ указанные отклонения не являются принципиальными и позволяют решить главную задачу – определение мест повышенной напряженности электрического поля при коммутационных перенапряжениях.

В первом эксперименте с исследованиями частотных свойств макета обмотки получили резонансную частоту 1 МГц. Модуль входного сопротивления на резонансной частоте был равен 13,7 Ом. при сопротивлении токового шунта 0,5 Ом. Распределения напряжения по обмотке и обкладкам на резонансной частоте в этом опыте приведены на рисунке 8.

Нетрудно заметить, что распределения напряжения вдоль 3-й и 4-й обкладок совпадает. При проверке макета было обнаружено, что обкладки оказались случайно закорочены между собой в одной точке. Несмотря на допущенную оплошность, результаты эксперимента признаны полезными по двум причинам. Во-первых, они доказывают существование резонансного усиления напряжения внутри ТТ. Во-вторых, видно, что в случае пробоя какого-либо из слоёв изоляции и образования коротки через проводящий канал пробоя между двумя обкладками, отрицательные следствия резонансных явлений могут усилиться. Последнее обстоятельство может резко сократить срок службы ТТ, в которых по результатам диагностирования обнаружено увеличение ёмкости изоляции в несколько процентов, сигнализирующее о пробое одного-двух слоёв изоляции.

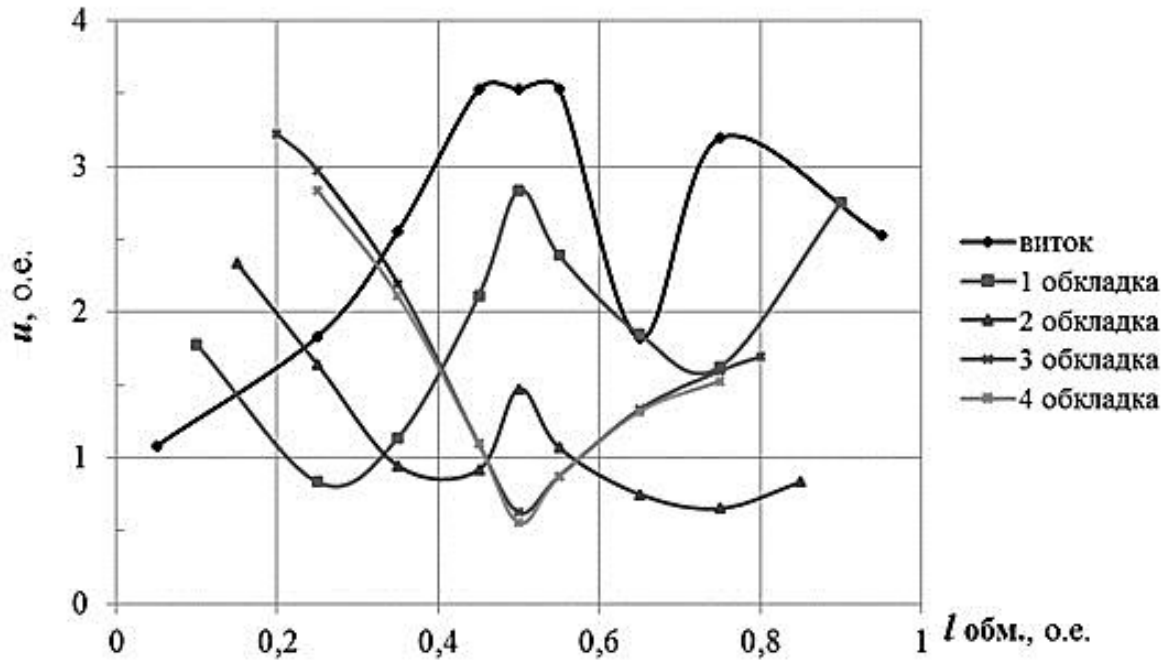


Рисунок 8 – Распределение напряжения по длинам витка и обкладок

После устранения неисправности эксперименты были продолжены. На рисунке 9 приведены амплитудно-частотные характеристики, полученные в первом и втором экспериментах. Частота резонанса в опыте № 2 увеличилась до 1,6 МГц, а модуль сопротивления снизился до 3,6 Ом.

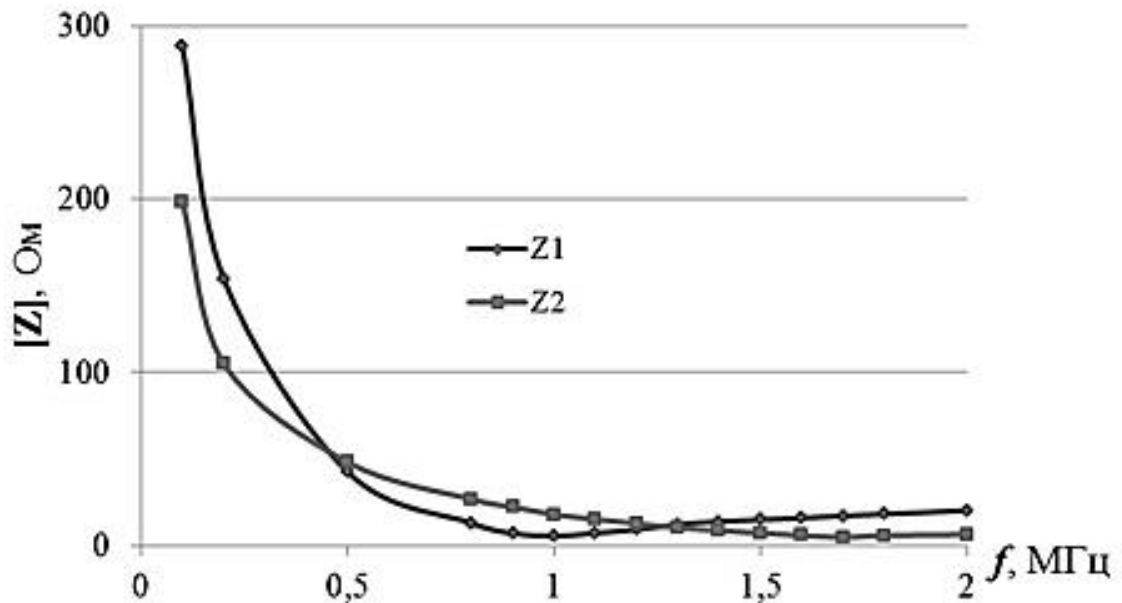
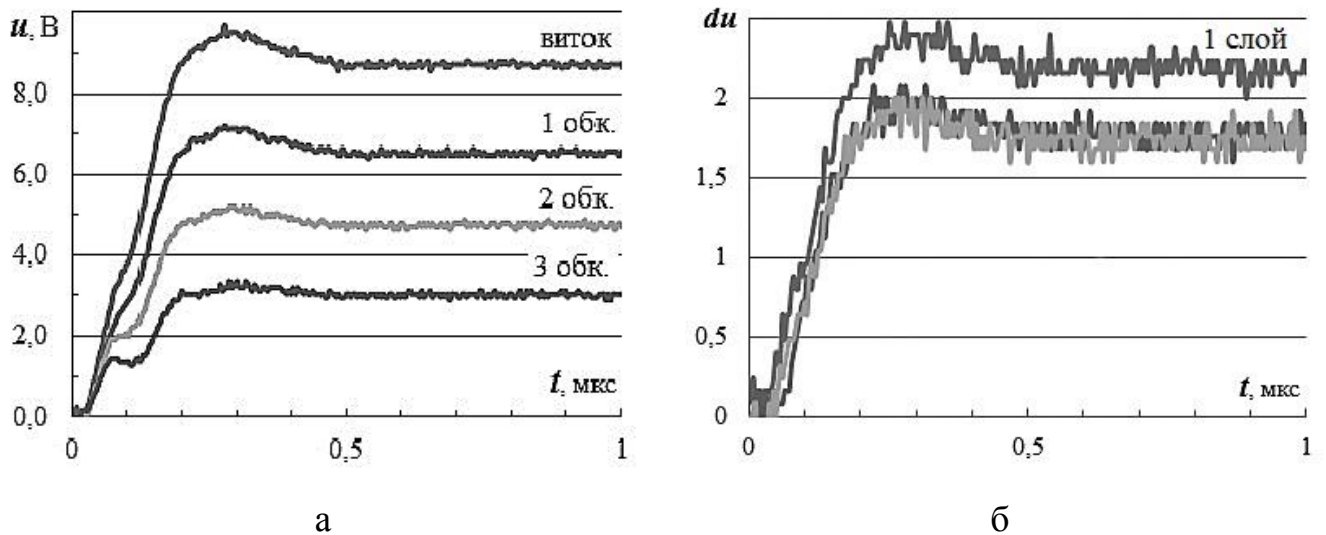


Рисунок 9 – Зависимость модуля входного сопротивления макета первичной обмотки от частоты в первом (Z_1) и втором (Z_2) опытах

Для измерений переходной характеристики на вход макета обмотки подавался прямоугольный импульс напряжения. Осциллограммы переходных процессов в средней части макета приведены на рисунке 10.



а б
Рисунок 10 – Потенциалы на витке и обкладках (а)
и напряжения на слоях изоляции (б) в середине первичной обмотки

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.

Ранее разработанная математическая модель для реального трансформатора тока ИМВ 550 (рисунок 6), была скорректирована, исходя из различия в емкости изоляции макета, о чём уже говорилось выше. Расчётные осциллограммы распределения напряжения по слоям в середине обмотки, полученные в расчете по математической модели, показаны на рисунке 11.

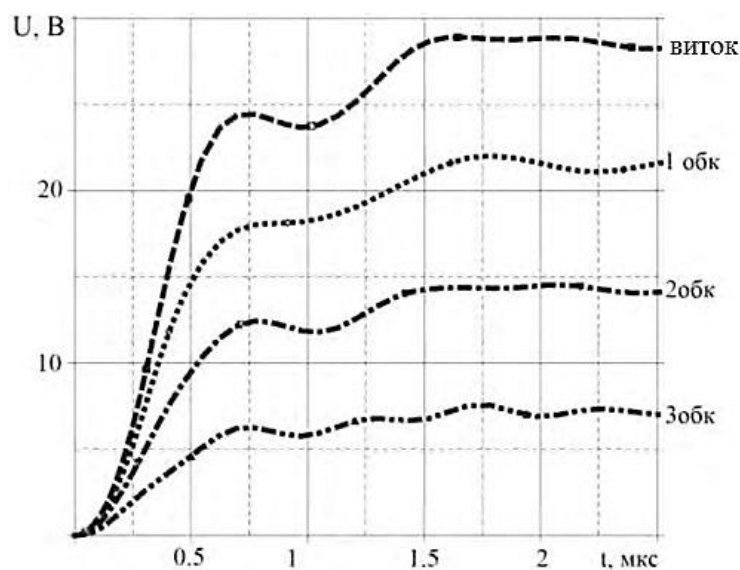


Рисунок 11 – Расчётные осциллограммы напряжений на витке и обкладках
в середине обмотки при нагрузке на шинах $C=390$ пФ, $R=18$ Ом

Они демонстрируют хорошее качественное и количественное совпадение с измеренными сигналами на физической модели трансформатора тока ИМВ-550 (рисунок 10,а), хотя распределение напряжения по слоям обмотки трансформатора тока было достаточно равномерным, что и должно было получиться при заданных длительности фронта (0,5 мкс).

Этот факт, а также введение в математическую модель индуктивности подножника $L_{\text{п}} = 5$ мкГн позволило сделать заключение о возможности использования модели (рисунок 12) для дальнейших исследований переходных процессов, происходящих внутри ТТ ИМВ 550, в реальных условиях на ПС Итатская.

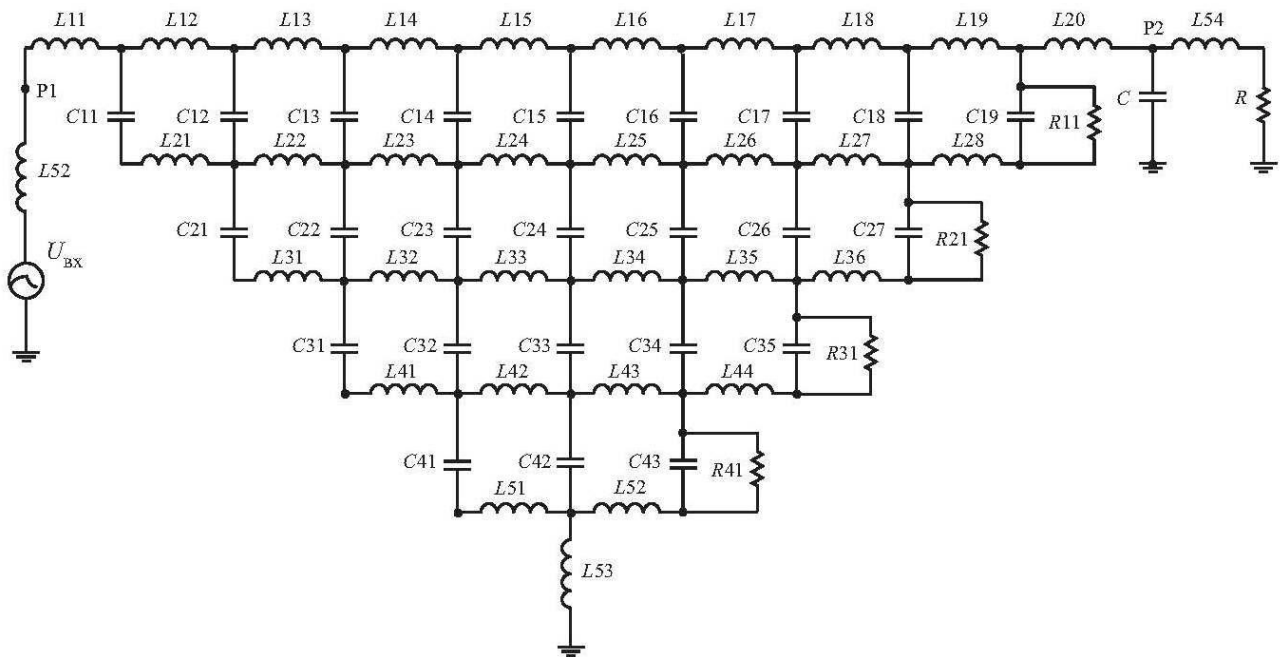


Рисунок 12 – Расчётная схема замещения трансформатора тока ИМВ 550 для режима коммутации линейного разъединителя

По результатам численных экспериментов, было установлено, что режим коммутации линейного разъединителя ШР-521, является наиболее тяжёлым для ТТ. Схема замещения для этого случая, приведена на рисунке 13.

При её синтезе считалось, что выключатель В-521 находится в отключённом состоянии, поэтому он моделировался ёмкостью $C = 1,4$ 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 14 для случая, когда на вход ТТ подаётся прямоугольный импульс напряжения большой длительности с амплитудой $U_{\text{вх.макс.}} = U_{\text{н.р.макс.}} = 428,7$ кВ и длительностью фронта 0,1 мкс.

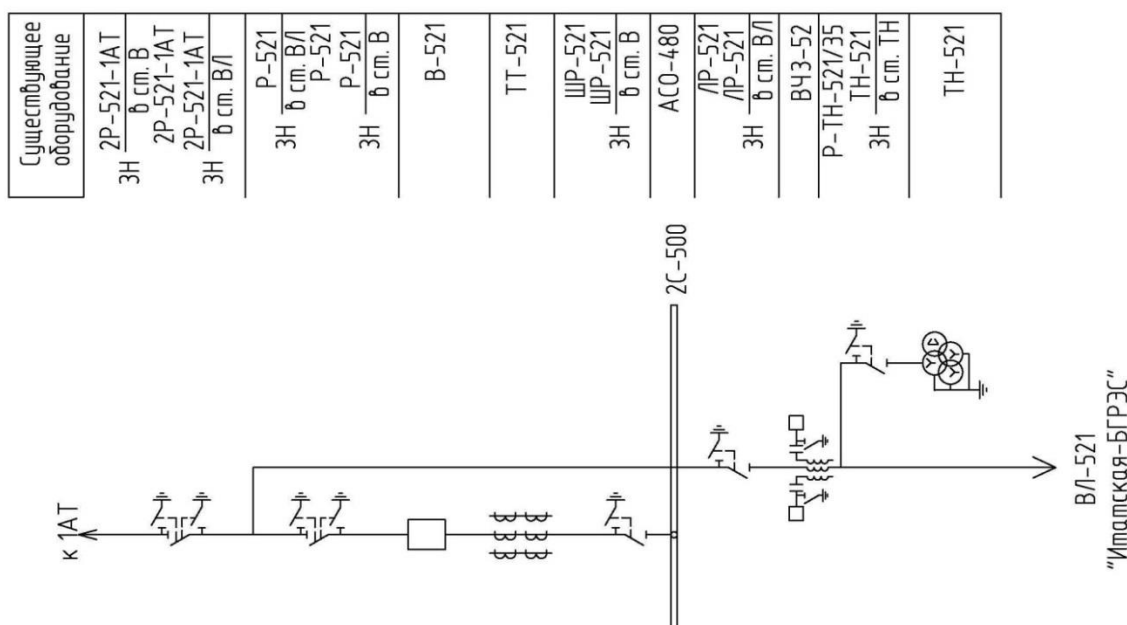


Рисунок 13 – Схема ячейки воздушной линии ВЛ-521 на открытом распределительном устройстве 500 кВ подстанции «Итагская - 1150 кВ»

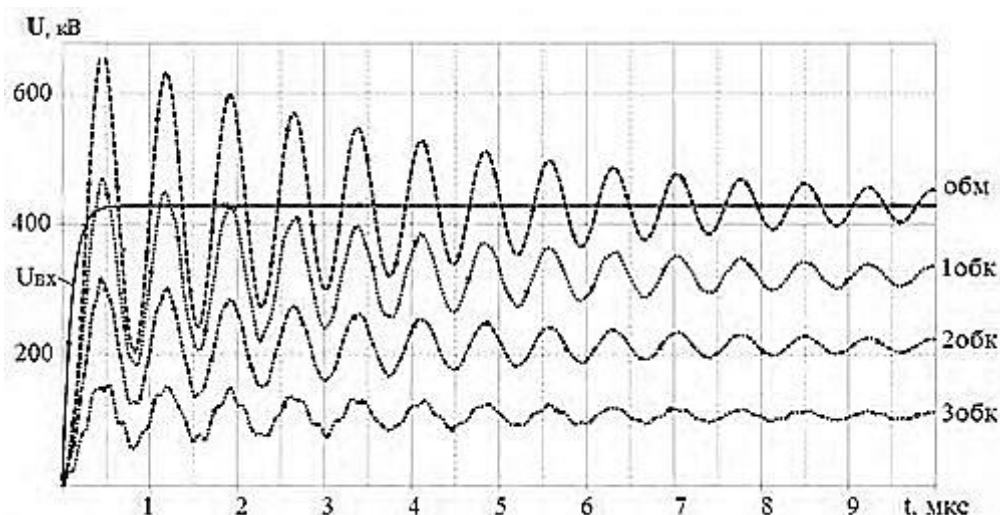


Рисунок 14 – Осциллограммы напряжений в середине обмотки для режима коммутации линейного разъединителя

На осциллограммах 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: чем круче фронт тем больше амплитуда внутренних перенапряжений. Поэтому указанная амплитуда соответствует максимально возможной, а для её снижения нужно любым из доступных способов увеличивать длительность фронта входного напряжения.

По итогам математического и физического моделирования трансформатора тока ИМВ 550 были сделаны выводы № 2 и № 3 Заключение.

Глава 4 посвящена диагностированию изоляции трансформаторов тока. Внезапные отказы ТТ чаще всего связаны с пробоем изоляции, что говорит о недостаточной эффективности традиционных диагностических методов. Применительно к исследуемым ТТ типа ИМВ 550 необходимость обнаружения начальных стадий развития повреждений изоляции усиливается из-за воздействия внутренних перенапряжений. В этой связи в работе были решены две задачи.

В первой, был опробован новый метод диэлектрической спектроскопии, т.е. измерения частотной характеристики тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) и ёмкости. Измерения проводились на трансформаторе тока ИМВ 550 с помощью прибора IDAX по нескольким схемам с использованием охранного электрода, устраняющего влияние токов утечки по поверхности на результаты измерений. Результаты измерений тангенса угла диэлектрических потерь и ёмкости изоляции первичной обмотки ТТ приведены на рисунке 15.

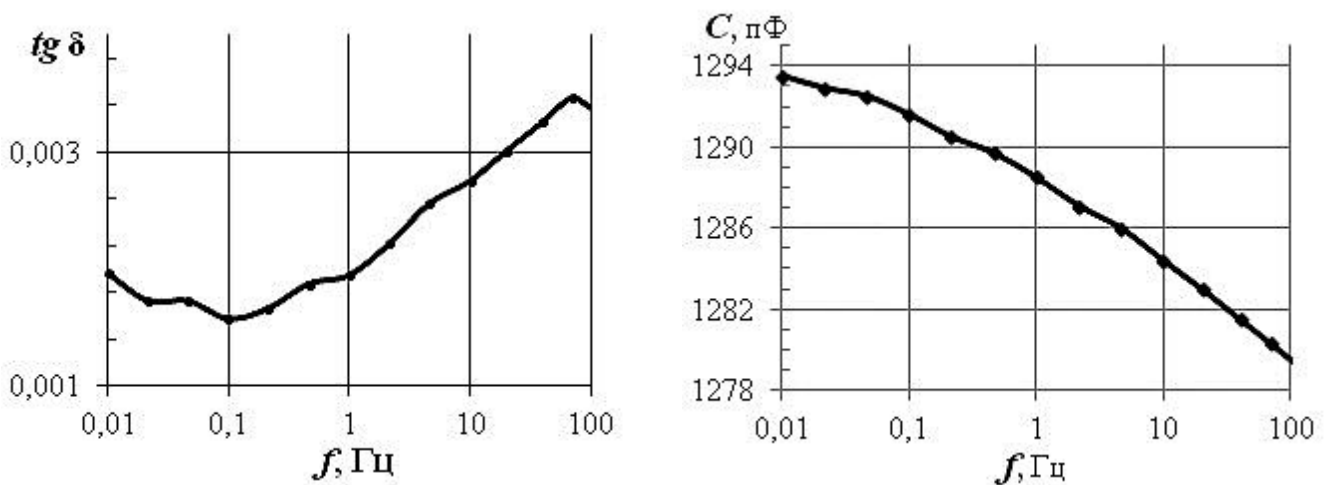


Рисунок 15 – Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и ёмкости изоляции первичной обмотки

Рост диэлектрических потерь в области частот менее 0,1 Гц и монотонный рост ёмкости при снижении частоты может быть следствием небольшого увлажнения изоляции испытуемого ТТ, однако, это предположение требует проверки на представительной выборке.

Наиболее интересные и важные по следствия результаты были получены в исследованиях трансформаторного масла, используемого в ТТ. Эксперименты были проведены в Институте органической химии СО РАН, а обсуждение их результатов было проведено с участием автора.

Центральное место в исследованиях было отведено искусственному старению отечественного масла ГК и двух проб шведского масла: свежего, условно названного ШМ-1, и бывшего в эксплуатации – ШМ-2. В пробы масел вводили добавки «ударной дозы» (2% весовых) антиоксидантной присадки агидол, а также углеводороды – декалин и ундекан, моделирующие поведение соответственно нафтеновых и парафиновых компонентов трансформаторных масел.

Расширенный химический анализ включал определение дополнительных макрохарактеристик масел (приведены в таблицах 2, 3) с использованием стандартных методик определения.

Таблица 2 – Данные химического анализа образцов трансформаторных масел

Показатели	ГК	ШМ-1	ШМ-2
Кинематическая вязкость, <i>сст</i> при 20 °С при 50 °С	21,4 7,9	не измеряли	16,0 6,1
Кислотное число, <i>мг КОН/г</i>	отсутствует	0.09	отсутствует
Летучие, % вес. при 100 °С	4,6	2,4	4,6
Йодное число, <i>гJ₂/100 г</i>	6,3	8,5	8,6
Перекисное число, <i>ммоль О/кг</i>	отсутствует	1.5	отсутствует

Кроме стандартных методов анализа масел, были проведены дополнительные:

- хромато-масс-спектрометрический анализ;
- ЯМР спектроскопия;
- УФ спектроскопия;
- ИК-спектроскопия;
- высоко-эффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ).

Таблица 3 – 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 ⁻¹	
			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. Обращает внимание отличные от нуля кислотное и, особенно, перекисное числа у образца ШМ-1.

После старения методом ВЭЖХ был проведен анализ содержания фурановых соединений в образцах масел. Суммарное содержание фурановых соединений в ШМ-1 и ШМ-2 составляло менее 1,5 мг/л, что на порядок ниже признанной опасной для состояния бумажной изоляции концентрации фуранов (>12 мг/л). На ВЭЖ-хроматограмме масла ГК пиков фурановых соединений не было 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 полиалкилзамещенных 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 после старения 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.

Химический анализ образцов масел 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). 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 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 трансформаторного масла может способствовать большей скорости его старения, в том числе, накоплению перекисных соединений.

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 одного из ТТ на ПС «Итатская – 1150 кВ».

По результатам «искусственного старения» модельных углеводородов декалина и ундекана подтвердился вывод авторов о том, что нафтеновые углеводороды более склонны к образованию стабильных перекисных соединений при окис-

лении: свободных кислот, эфиров, спиртов, карбонильных соединений. В шведских маслах нафтеновые 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 при отрицательных температурах. 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 углеводородов.

При анализе трёх образцов-фракций X-воска, полученных разделением суммы экстрактивных веществ (таблица 4), было установлено, что фракция ХВ-1 ещё жидкая, но имеет более вязкую консистенцию по сравнению с маслами, а фракции ХВ-2 и ХВ-3 твёрдые. Температуры плавления образцов коррелируют с их средними молекулярными массами.

Таблица 4 – Характеристики и данные химического анализа фракций X-воска

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

В ИК спектрах всех перечисленных образцов присутствовали полосы поглощения, характерные для углеводородов масел ШМ, а также полосы поглощения карбонильных и гидроксильных групп. Соотношение интенсивностей последних различно: в образце ХВ-1 представлены преимущественно карбонильные группы, а в образце ХВ-3 – гидроксильные группы перекисных соединений. Для каждого из упомянутых образцов определены перекисные числа (таблица 5), увеличивающиеся с ростом молекулярной массы и температуры плавления при переходе от ХВ-1 к ХВ-3. Таким образом, установлено, что X-воск состоит из олигомеризованных углеводородов масел, содержащих активные перекисные и полярные карбонильные и карбоксильные группы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 В результате проведённых испытаний на подстанции «Итатская – 1150 кВ» 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. Они связаны с возбуждением свободных колебаний напряжения с резонансной частотой внутри самого трансформатора тока. Значения этих напряжений могут превышать внешнее напряжение и вызывать ускоренное старение изоляции ТТ.

2 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.

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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1 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.

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

Научные публикации в других изданиях:

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

4 Фомина И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения / Фомина И.А. // Современная техника и технологии: сб. трудов XVI международн. н.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, том 1, Томск, апрель 2010. С. 134 – 135.

5 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: сб. научн. трудов 5-й международной н.-техн. конф., С.-Петербург, июнь 2010. - С. 213 – 219.

6 Фомина И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения / Фомина И.А. // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы: материалы Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, сентябрь 2010. – С. 199 – 205.

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

8 Фомина И.А. Частотные и переходные характеристики вводов и трансформаторов тока с изоляцией конденсаторного типа / А. Г. Овсянников, И. А. Фомина // Диагностика электрических установок: материалы 8-го науч.-практ. семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок, Тюмень, апрель 2013 г. – Новосибирск, ОСС ДЭУ, 2013. – С. 46–52.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 569; подписано в печать 10.04.2017 г.