

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование кафедры)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки)

Общая теория электромеханического преобразования энергии
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Электродинамическая стойкость обмоток трансформатора
ТДН 10000/220»

Студент

В.А. Губарев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

В.В. Ермаков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы к.т.н., профессор В.В. Ермаков

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2018 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

Аннотация

Целью магистерской работы является разработка мероприятий по повышению сопротивляемости обмоток силового трансформатора протекающим токам короткого замыкания.

Для достижения заданной цели в работе выполнено следующее:

- рассмотрены особенности поведения силового трансформатора при протекании через его обмотки токов короткого замыкания;
- проанализированы статистические данные по повреждениям силовых трансформаторов токами короткого замыкания, определены наиболее часто повреждаемые трансформаторы;
- рассмотрен механизм появления повреждений в обмотках под воздействием токов короткого замыкания;
- проведена комплексная оценка параметров электродинамической стойкости обмоток силовых трансформаторов;
- проанализированы критерии оценки электродинамической стойкости и методы расчета в том числе с применением электронно-вычислительной техники;
- схематично рассмотрено воздействие различных электродинамических сил на обмотки трансформаторов, показаны направления воздействия, взаимодействие сил;
- выбраны наиболее перспективные решения, позволяющие повысить электродинамическую стойкость;
- разработаны рекомендации по повышению сопротивляемости обмоток силового трансформатора ТДН10000/220 протекающим токам короткого замыкания.

Оглавление

Введение.....	5
1 Краткий анализ проблемы электродинамической стойкости обмоток трансформатора	13
1.1 Испытания на электродинамическую стойкость обмоток трансформатора.....	13
1.2 Влияние короткого замыкания на электродинамическую стойкость	16
1.3 Повреждения обмоток трансформатора под воздействием токов короткого замыкания	19
1.4 Анализ статистических данных по повреждениям трансформаторов токами короткого замыкания, определение наиболее часто повреждаемых трансформаторов.....	31
1.5 Выводы по главе 1.....	34
2 Оценка параметров электродинамической стойкости обмоток силовых трансформаторов.....	37
2.1 Критерии оценки электродинамической стойкости, методы расчета	37
2.2 Описание электродинамической стойкости обмоток под воздействием осевых и радиальных электромагнитных сил	54
2.3 Описание тангенциальных сил, возникающих в обмотках	55
2.4 Выводы по главе 2.....	57
3 Разработка рекомендаций по повышению электродинамической стойкости обмоток силового трансформатора при коротком замыкании.....	58
3.1 Общие рекомендации по оптимизации электродинамической стойкости обмоток.....	58
3.2 Оптимизация по стойкости к осевым силам	60
3.3 Оптимизация по стойкости к радиальным силам.....	65
3.4 Оптимизация по стойкости к тангенциальным силам	66

3.5 Рекомендации по повышению электродинамической стойкости	
трансформатора ТДН10000/220.....	67
Заключение	80
Список используемых источников.....	83

Введение

Электроэнергетика в современном мире является одной из основ независимости государства и развития его промышленности и общества. В последнее время при оценки деятельности какого-либо предприятия на одно из первых мест вышел такой показатель как электроэнерговооруженность, который показывает сколько энергии приходится на одного работающего, занимающегося производством продукции. Несмотря на фундаментальность электроэнергетики и безусловно её важность, в ней также существует множество проблем. Одной из них является большие капиталовложения для постройки или капитальной модернизации предприятия, занимающегося производством электроэнергии. Несмотря на большую территорию и довольно развитую промышленность, Россия производит электроэнергии в четыре раза меньше США, и в пять раз меньше Китая [1].

Потребителей электроэнергии традиционно можно разделить на четыре категории:

- промышленность (около 35%);
- топливно-энергетический комплекс (примерно 19%);
- население(около 16%);
- железная дорога, сетевые потери, непроизводственные организации (остальное, примерно 30%).

Распределение данной статистики по регионам показывает значительное изменение доли каждой группы в общем объеме потребления. Например, в Сибирском регионе основными потребителями энергии являются промышленные предприятия, а в европейской части увеличивается доля населения.

Электрическую энергию в России вырабатывают около 600 электростанций. Общий объем вырабатываемой энергии около 217 ГВт. Важное значение при выработке электроэнергии имеет график нагрузки и годовое время использования. Наибольшее количество выработанной

электроэнергии приходится на тепловые электростанции (примерно 69%). В зависимости от доступности топлива, они могут работать практически на любом горючем топливе, но в первую очередь на газе. Здесь выделяется Сургутская государственная районная электростанция (ГРЭС-2) мощностью 5600 МВт.

Основным программным документом, в котором отражается видение развития энергетической отрасли в Российской Федерации является разработанная в 2006 году программа «Целевое видение развития электроэнергетики России на период до 2030 г». Согласно этому документу прогноз на потребление электрической энергии в России в 2030 году составит около 2000 млрд.кВт*ч. Несмотря на бездефицитный спрос на электрическую энергию на территории России, к 2030 году более половины всех электропроизводящих мощностей выработает свой ресурс. Это приведет к значительному сокращению производящих мощностей, что может вызвать дефицит электроэнергии, повысить её стоимость. Одновременно вырастет количество отказов и аварий в энергетической системе. В связи с ростом продаж природного газа в зарубежные страны, актуальным может стать вопрос перевода некоторых тепловых электростанций на каменный уголь.

Большой проблемой современной энергетики является очень значительное количество потерь энергии (примерно 12% от переданных в электросеть). Из них большая часть приходится на технологические потери. Для поддержания энергетической отрасли на должном уровне 2030 году потребуется иметь в наличии 350-370 млн. тонн условного органического топлива. Как альтернатива этому – развитие гидроэнергетики, атомной и альтернативной энергетики.

Силовой трансформатор занимает центральное место в энергетической системе любого государства[2]. Этому способствуют не только технические причины, но и экономические. Например, это очень большие возможные финансовые потери при выходе трансформатора из строя.

Одной из опасностей при эксплуатации силовых трансформаторов, является воздействие на него возможных токов короткого замыкания, а также повышенные значения токов включения, многократные наброски нагрузки, воздействие которых способствуют появлению в обмотках трансформатора электродинамических сил, а также вызывающих перегрев обмоток.

Эти режимы, близкие к аварийным, обязательно должны учитываться при расчете и проектировании силовых трансформаторов. Сопротивляемость конструкции трансформатора воздействию токов короткого замыкания, должна просчитываться на стадии расчета трансформатора, затем проверяться при проведении испытаний [2].

Относительно обмоток силового трансформатора, короткие замыкания делятся на внутренние и внешние.

Внутренние короткие замыкания в свою очередь делятся на межвитковые, замыкания проводников обмоток на корпус, междуфазные. Когда речь идет о динамической стойкости трансформатора, то внутренние короткие замыкания обычно не рассматриваются, считая, что при нормальном проектировании и изготовлении трансформатора их не должно быть [3].

В зависимости от участвующих в замыкании количества фаз, внешние короткие замыкания могут быть однофазными, двухфазными, трёхфазными. На трехфазные короткие замыкания приходится наименьшее количество статистических случаев (не более 10%), но при этом мощность таких замыканий наибольшая, а значит и возможные последствия от их возникновения наиболее тяжелые. По этому, расчет и проектирование трансформаторов на динамическую стойкость ведется именно для этого аварийного режима.

При проведении анализа аварийного трансформатора, пострадавшего от воздействия тока короткого замыкания, важно выяснить настоящую первопричину полученных при этом механических повреждений. Это особенно важно для разработки рекомендаций и предложений, направленных на

повышение динамической стойкости конструкции силовых трансформаторов и улучшение условий эксплуатации.

Таким образом, обеспечение стойкости силового трансформатора к названным выше аварийным и близким к аварийным режимам, всегда была сложной научно-технической проблемой, с которой боролись с самого появления трансформаторов. В настоящее время данная проблема стала ещё более актуальной, так как значительно сократилось количество трансформаторов, испытываемых на стойкость при коротком замыкании, значительно снизился объем научных исследований в данной области, забывается приобретенный ранее опыт работ в этой области. Ведущими организациями, разрабатывающими методики расчета и испытаний силовых трансформаторов на динамическую стойкость, являются Федеральное ГУП «Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина» (ФГУПВЭИ), украинский институт трансформаторостроения «ВИТ-ЭЛЕКТРОЗАВОД», ООО «Тольяттинский Трансформатор» и др[4].

Основные тенденции развития трансформаторостроения.

Глобализация рынка и развитие транснациональных корпораций в последнее десятилетие значительно повлияла на стратегию и тактику развития энергетической системы, а значит оказало влияние и на трансформаторостроение. Несколько мировых экономических кризисов, последующих за относительно небольшое время друг за другом, также повлияли на процессы, происходящие в энергетической отрасли. Различные экономики отреагировали на это по-разному. В экономиках с развитой энергетикой и давними традициями были отслежены следующие тенденции:

- уменьшение закладки строительства новых энергетических объектов и снижение темпов ввода в эксплуатацию уже строящихся объектов, что значительно сократило темпы развития энергетической отрасли;
- на действующее энергетическое оборудование возросла нагрузка;

- вместо списания в утиль энергетического оборудования, выработавшего свой ресурс, стали разрабатываться различные мероприятия по продлению срока их эксплуатации;

- толчок к развитию получили средства диагностики, оценки технического состояния и прогнозирования ресурса энергетического оборудования.

Несмотря на мировой кризис, экономики бурно развивающихся стран (Китай, Южная Корея и др.) требуют всё большее количество электроэнергии и способствуют развитию энергосистем. Основные тенденции развития следующие:

- для соединения удаленных друг от друга источников электрической энергии и её потребителей строятся новые электрические сети, электрические станции и линии электропередач: переменного тока 750 и 1000-1200 кВ, постоянного тока ± 400 - ± 800 кВ;

- устройства регулирования потоков энергии на основе современной силовой электроники, различные устройства контроля и распределения потоков энергии на основе современных алгоритмов, с применением систем искусственного интеллекта, повышенное влияние на качество передаваемой энергии, её активное и реактивное наполнение, более качественное регулирование параметров электроэнергии.

В кризис, многие государства оказали федеральную поддержку своей энергетике, в первую очередь своим производителям электротехнического и электроэнергетического оборудования в виде дополнительных заказов и финансировании реконструкции отечественных заводов[5]. В первую очередь это касается производства трансформаторного оборудования высших классов напряжения. Также государство может поддержать отечественного производителя введением барьерных мер от полного завоевания рынка зарубежными компаниями (ввозные пошлины, дополнительная сертификация продукции и т.д.)

Заводы по производству трансформаторов, попав в условия жесткой конкуренции, вынуждены больше средств вкладывать в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР):

- расширять модельный ряд выпускаемой продукции, в том числе по индивидуальным требованиям заказчиков;
- искать и внедрять новые материалы, комплектующие и технологии;
- повышать эксплуатационные свойства трансформаторов, в том числе увеличивать допустимые удельные нагрузки (тепловые, высоковольтные, электромагнитные).

На территории России за последнее десятилетие построено несколько полностью новых заводов по производству трансформаторов, среди них:

- ООО «Силовые машины – Тошиба. Высоковольтные трансформаторы» – это совместное предприятие (СП) по производству высоковольтных трансформаторов ПАО «Силовые машины» и корпорации «Тошиба», г. Санкт-Петербург. Создан в 2011 году. Имеет мощности по выпуску свыше 10.000 МВА в год. Основная продукция масляные силовые трансформаторы и автотрансформаторы 110–750 кВ мощностью свыше 25 МВА[6];

- ООО «Электромашиностроительный завод», г. Екатеринбург. Создан в 2012 году. Основная продукция - силовые трансформаторы, реакторы. Завод обладает аттестацией ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «Холдинг МРСК» и ОАО «Газпром» и др. [7]

Таким образом, определяющим требованием, предъявляемым к трансформаторам на современном этапе состояния и развития энергосистем – это его надежность. Теоретические и экспериментальные исследования выявили и подтвердили соответствие затрат на ликвидацию выявленной неисправности во время проектирования, во время производства, во время испытаний и во время работы у потребителя, примерно как 1:10:100:1000.

Актуальность работы.

Актуальность работы обусловлена необходимостью дальнейшего повышения надежности федеральной энергетической системы за счет

повышения надежности её основного структурного компонента – силового масляного трансформатора.

Цель работы.

Целью данной работы является повышение электродинамической стойкости обмоток силового трансформатора при коротком замыкании

Задачи исследования:

- всесторонне рассмотреть проблему электродинамической стойкости обмоток силового трансформатора при коротком замыкании;
- выбрать наиболее перспективные решения, позволяющие повысить электродинамическую стойкость;
- разработать рекомендации по повышению электродинамической стойкости обмоток силового трансформатора при коротком замыкании.

Практическая значимость.

Практическая значимость обусловлена разработкой рекомендаций по повышению динамической стойкости конкретных типов трансформаторов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Мероприятия по повышению электродинамической стойкости обмоток и их весовой коэффициент.
2. Рекомендации по повышению динамической стойкости конкретных типов трансформаторов.

Новизна магистерской диссертации

1. Новизна работы заключается в комплексной оценке динамической стойкости обмоток силовых масляных трансформаторов и разработке комплекса мероприятий по её повышению.

По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи [149, 20, 21].

1. Губарев В.А., Густилин А.А. Использование переключения с треугольника в звезду для регулирования напряжения в преобразовательных трансформаторах. Сборник научных статей «Тенденции и перспективы развития науки XXI века». Выпуск 33. В 2 ч. Ч.2/ - Уфа: Аэтерна, 2017.- с. 48-50

2. Губарев В.А. «Формы и методы привлечения трудовых кадров». Сборник статей международной научно-практической конференции «Наука: прошлое, настоящее, будущее». 15 августа 2015 года: в 2-х ч. Ч. 1./- Уфа: Аэтерна, 2015.- с. 106-108

3. Губарев В.А. «Определение потребности промышленно-производственного персонала». Сборник статей международной научно-практической конференции «Наука: прошлое, настоящее, будущее». 15 августа 2015 года: в 2-х ч. Ч. 1./- Уфа: Аэтерна, 2015.- с. 108-110

Структура и объём работы.

Структура: введение, 3 раздела, заключение, список использованной литературы, включающий 32 наименования.

Объем: 87 страниц машинописного текста.

1 Краткий анализ проблемы электродинамической стойкости обмоток трансформатора

1.1 Испытания на электродинамическую стойкость обмоток трансформатора

Одним из требований, предъявляемых к мощным силовым трансформаторам, является их способность сохранять нормальное функционирование после протекания по их обмоткам токов короткого замыкания. Как известно, протекание тока сопровождается воздействием на проводник механической силы и его нагревом. При чём, чем больше ток, тем сильнее эти проявления. Таким образом, под стойкостью силовых трансформаторов понимаются две их составляющие:

- а) кратковременная стойкость к резкому повышению температуры обмоток, т.е. термическая стойкость;
- б) стойкость к воздействию электродинамических сил, т.е. электродинамическая стойкость.

В своей работе я рассмотрел только электродинамическую стойкость силовых трансформаторов при коротких замыканиях.

Стойкость силовых трансформаторов воздействию токов короткого замыкания закладывается на стадии проектирования трансформаторов и должна подтверждаться проведением испытаний на электродинамическую стойкость.

Здесь существуют две основные проблемы:

- экономическая;
- техническая.

С экономической точки зрения испытания силовых трансформаторов на электродинамическую стойкость очень дорогой вид испытаний. Во-первых, трансформатор выходит из строя, а, например, стоимость силового трансформатора ТДЦ-250000/220 составляет несколько миллионов рублей. В

условиях значительного снижения заказов в последнее время это является важным аргументом заводов-изготовителей не проводить разрушаемые испытания. Во-вторых, создание нового мощного испытательного центра оценивается в 10-12 млрд. руб[5]. Такие крупные расходы может взять на себя только государство.

Техническая проблема заключается в том, что во время перестройки экономики РФ самый мощный сетевой испытательный стенд МИС ВЭИ г. Тольятти (см. рисунок 1) быстро пришел в нерабочее состояние и был закрыт. Выбор города Тольятти в качестве площадки для строительства МИС ВЭИ был обусловлен в первую очередь близостью Волжской ГЭС и развитой сетевой инфраструктурой. Основные силовые характеристики стенда МИС ВЭИ:

- напряжение 500-1150 кВ;
- мощность короткого замыкания 12-18 ГВА;
- мощность испытываемых трансформаторов до 666 МВА;
- мощность испытываемых реакторов и другого электроэнергетического оборудования до 500 кВ. и выше.

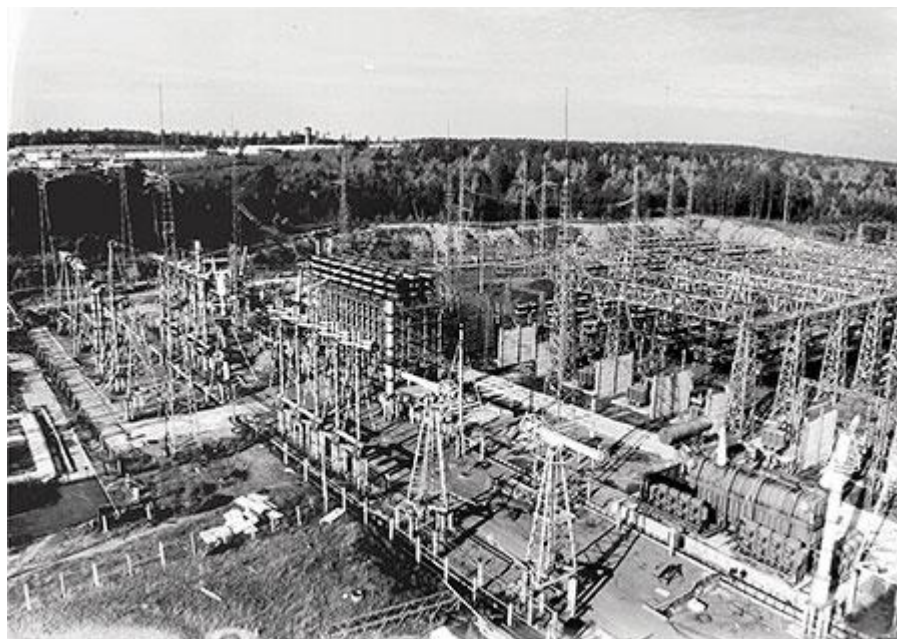
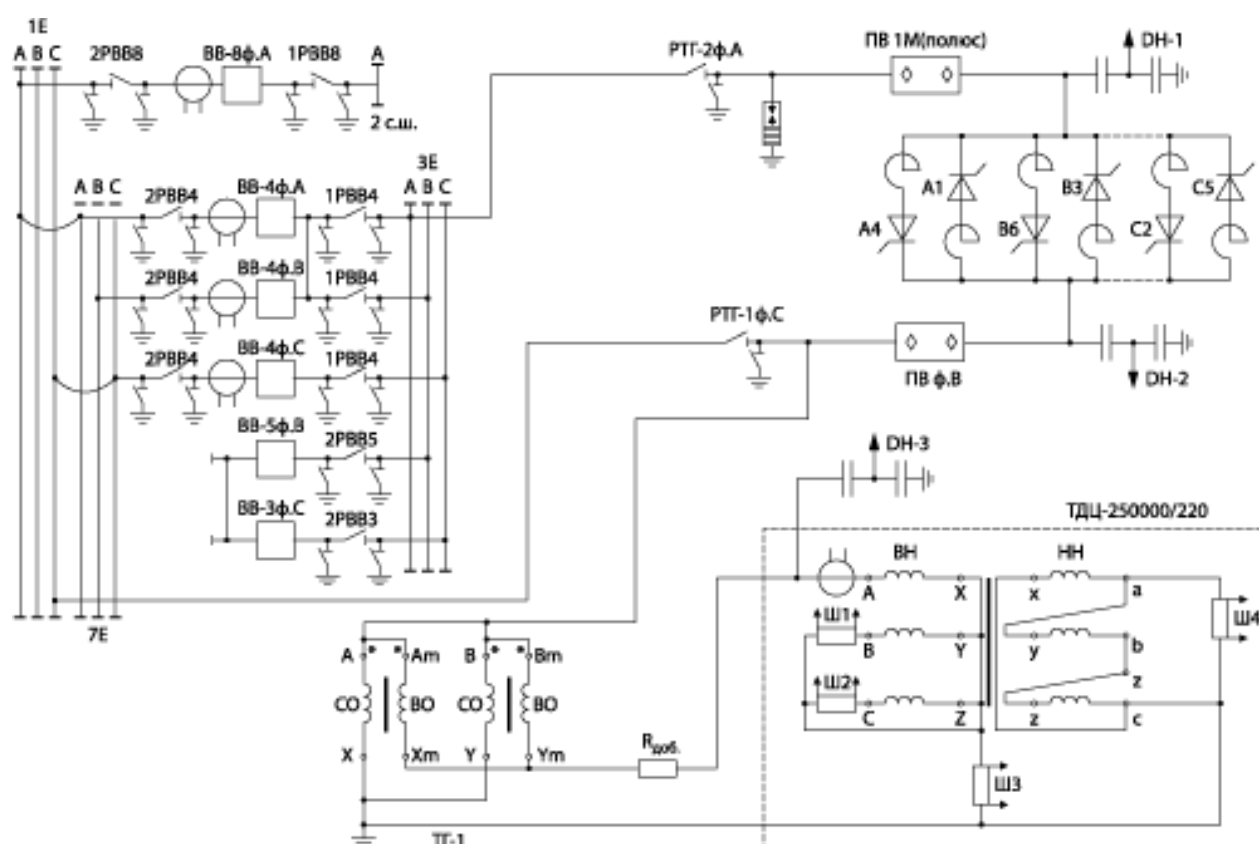


Рисунок 1- Сетевой стенд МИС ВЭИ

За время работы стенда МИС ВЭИ (с 1983 по 1994 год) были полноценно испытаны около тридцати силовых трансформаторов и реакторов. В частности были полноценно испытаны трансформаторы типа ТДЦ-250000/220, ОДЦ-333000/750, ТДЦ-400000/220, АДТН-63000/220/110, сверхмощный ТЦ-666000/500 и др. Для испытания разных типов трансформаторов использовались различные схемы. Например, схема электродинамических испытаний трансформатора ТДЦ-250000/220, с искусственно замкнутой фазой А обмотки НН, приведена на рисунке 2.



Ш1...Ш4 – токоизмерительные малоиндуктивные шунты; ПВ – преобразовательный вентиль; $R_{доб}$ – добавочное сопротивление для ограничения токов КЗ; ДН – делители напряжения емкостного типа; А1...А4, В3...В6, С2...С5 – тиристорные высоковольтные вентили; ТГ – трансформаторные промежуточные группы; ВВ – высоковольтные выключатели; РВВ – высоковольтные разъединители

Рисунок 2- Схема электродинамических испытаний трансформатора ТДЦ-250000/220

Выводы о перспективах восстановления испытательных мощностей в России[5]:

- на подстанции 750 кВ «Опытная» можно организовать электродинамические испытания силовых трансформаторов мощностью 80 МВА/110 кВ, 250 МВА/220 кВ и даже 666 МВА/500 кВ в случае подачи единственного напряжения со стороны Конаковской ГРЭС и отключении на время испытаний ВЛ 750 кВ «Опытная – Белый Раст» и «Калининская АЭС – Опытная». При этом необходимо сохранить передачу электроэнергии по ВЛ 750 кВ в сторону Московского энергоузла;

- на подстанции 750 кВ «Белый Раст» можно получить требуемые нормированные значения токов короткого замыкания для электродинамических испытаний силовых трансформаторов типа ТДЦ-250000/220, ТДЦ-80000/110 и ТЦ-666000/500 при подачи напряжения со стороны Конаковской ГРЭС и подпитки мощности КЗ по линиям «Опытная – Белый Раст», «Бескудниково – Белый Раст», «Очаково – Белый Раст»;

- на подстанции 330 кВ «Восточная» МЭС Северо-Запада возможны электродинамические испытания силовых трансформаторов мощностью 80 МВА/110 кВ, 250 МВА/220 кВ и 666 МВА/500 кВ.

1.2 Влияние короткого замыкания на электродинамическую стойкость

При соединении между собой фаз вторичной обмотки трансформатора через сопротивление, величина которого меньше номинального сопротивления нагрузки, возникает режим работы трансформатора под названием короткое замыкание[8]. Негативное проявление этого режима – резкое повышение температуры обмотки (до 500 °С в течении нескольких секунд) и резкое

увеличение механических усилий, которые стремятся раздвинуть обмотку в осевом и радиальном направлениях. Механические усилия прямо пропорциональны произведению токов в обмотках I_1 и I_2 (см. рисунок 3). Например, если произведение токов увеличивается в 100 раз, то механические усилия возрастут в 10000 раз [9, 28].

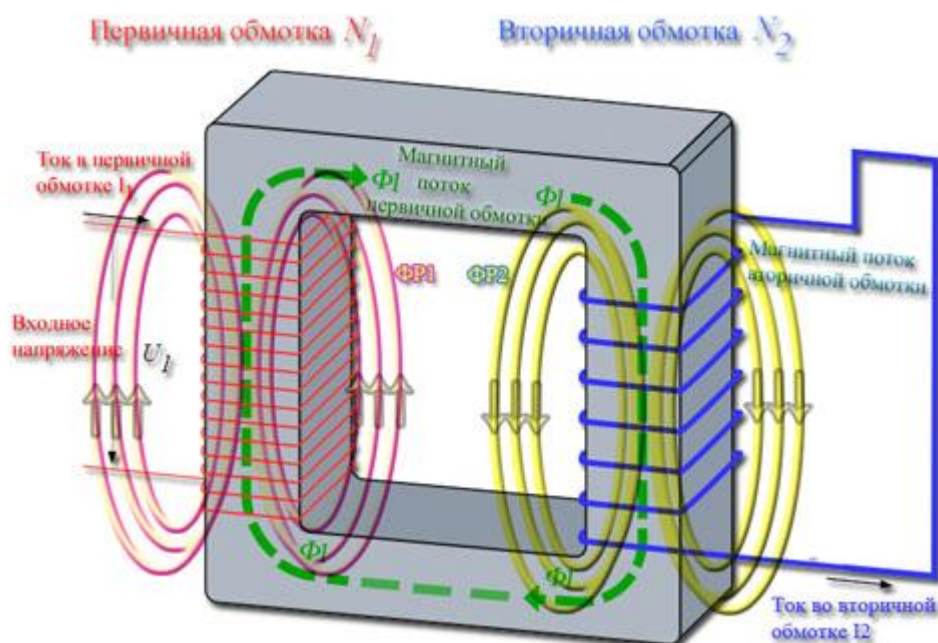


Рисунок 3- Магнитная схема трансформатора в режиме короткого замыкания

Но в реальности механические силы меньше. Это связано с тем, что токи короткого замыкания «ограничиваются» магнитными потоками рассеяния (на рисунке 3 они обозначены Φ_{P1} и Φ_{P2}) или, по другому говоря, за счет возрастания индуктивного сопротивления вторичной обмотки. Также важно, что при коротком замыкании магнитный поток от вторичной обмотки распространяется не по материалу сердечника, а по воздуху, минуя витки первичной обмотки. Это вызовет возникновение электродвижущей силы (ЭДС) опять же во вторичной обмотке [29]. При этом ЭДС от потока рассеяния будет в противофазе от ЭДС U_2 , что также ограничивает ток короткого замыкания [10].

Однако этих «естественных» процессов не достаточно для борьбы с последствиями коротких замыканий и необходимо прорабатывать конструкцию трансформатора с учетом динамической стойкости и предусматривать быстродействующую защиту от токов короткого замыкания в электрической сети.

Изменение напряжений и токов в режиме короткого замыкания показано на рисунке 4 [11].

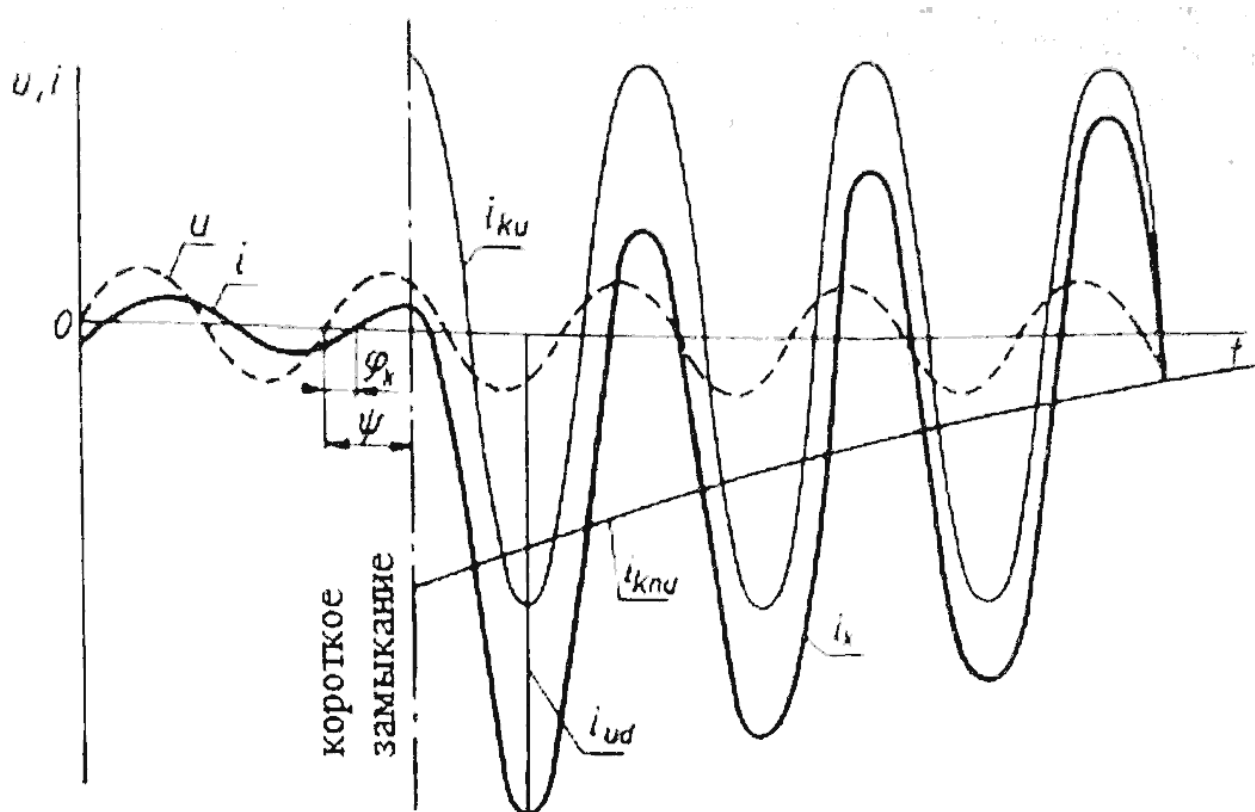


Рисунок 4-Изменение напряжений и токов в режиме короткого замыкания

Как видно из рисунка 4, ток короткого замыкания протекает в две стадии: стадия неустановившегося (переходного) тока КЗ и стадия установившегося тока КЗ, величина которого зависит от параметров электрической сети и от напряжения короткого замыкания трансформатора u_k . [8] Соотношение тока короткого замыкания $I_{кк}$ номинальному току I_n отражается формулой (1)

$$\frac{I_K}{I_H} = \frac{100}{u_K} \quad (1)$$

Время протекания неустановившегося тока короткого замыкания составляет в среднем от 0,02 до 0,2 с. [9]

Если вовремя не отключить трансформатор (защита от КЗ не достаточно быстродействующая), то ещё возможно проявление такого нежелательного явления как резонанс. В данном случае должны совпасть частоты тока в обмотках и в электродинамической силе. Возникновение резонанса также увеличит осевые силы, воздействующие на обмотки.

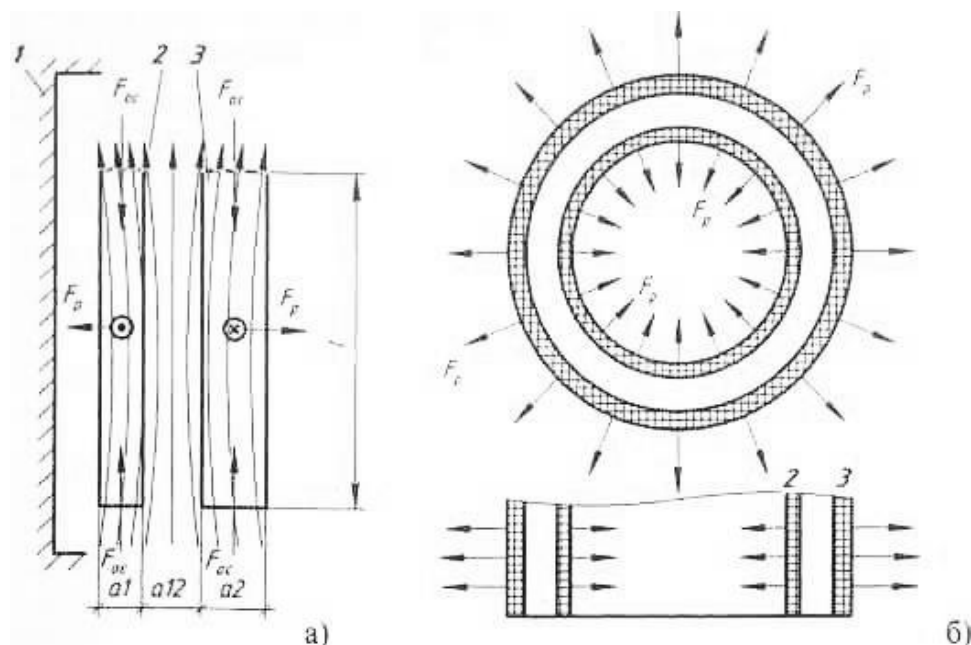
Таким образом, обобщая влияние токов КЗ на трансформатор, можно выявить следующие причины, влияющие на тяжесть последствий [12]:

- надежность работы коммутационных аппаратов и степень быстродействия защитных средств;
- расстояние от эпицентра короткого замыкания до трансформатора;
- величина ударного коэффициента;
- технические параметры трансформатора, в первую очередь номинальная мощность и мощность короткого замыкания системы;
- степень износа непосредственно самого трансформатора;
- проектная и конструкторская проработка трансформатора;
- расстояние от трансформатора до мощных источников генерации в системе;
- схемы соединения трансформатора.

1.3 Повреждения обмоток трансформатора под воздействием токов короткого замыкания

Обмотки трансформатора во время работы испытывают постоянное воздействие механических сил, возникающих при протекании тока по обмоткам

и проводникам. В случае, если обмотка концентрической формы, в её проводах возникают радиальные силы, стремящиеся сжать внутреннюю обмотку и растянуть наружную обмотку (см. рисунок 5) [13]



а) осевые силы в продольном разрезе; б) радиальные силы в поперечном разрезе; 1- магнитопровод трансформатора; 2- обмотка внутренняя; 3- внешняя обмотка

Рисунок 5- Направление действия сил в обмотках

В случае, если межвитковое расстояние равномерное, или при отсутствии зазора между ними, механические силы воздействуют на витки обмоток примерно равномерно. Отсутствие зазора также снижает вероятность возникновения остаточных деформаций проводников. Сжатие внутренней обмотки является причиной потери устойчивости обмотки в радиальном направлении, даже при относительно небольших превышениях над номинальными значениями.

Экспериментально доказано, что для повышения устойчивости в радиальном направлении, необходимо увеличить плотность намотки витков обмотки в осевом направлении. К технологическим способам повышения

устойчивости обмоток относится стремление к изготовлению «идеальных» обмоток.

Кроме осевых и радиальных сил при работе трансформатора в его обмотках возникают и тангенциальные силы [11], по своей силе значительно уступающие двум названным. Другое название тангенциальных сил – «скручивающие» или «поворачивающие». Как видно из рис. 6, своё второе название тангенциальные силы получили за желание скрутить или повернуть часть обмотки: $F_{т.верх}$ стремится скрутить верхнюю часть обмотки, а $F_{т.низ}$ – стремится скрутить нижнюю часть; сила F_t стремится повернуть обмотку.

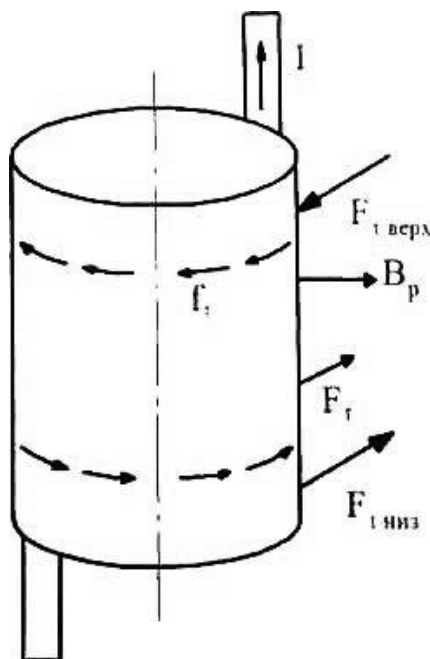


Рисунок 6- Воздействие на обмотку тангенциальных сил

Рассмотрим примеры осевых остаточных деформаций.

На рисунке 7 показана поврежденная обмотка низшего напряжения трансформатора ТДЦ- 250000/220: в нижней части обмотки нарушена изоляция и охлаждающие каналы, нижние катушки изогнуты дугой (осевые силы вытолкнули их вверх). Величина $R_{кзв}$ в режиме ВН-ННА $Z_k = +20\%$ от номинальной величины.

На рисунке 8 показано распушение верхних витков обмотки НН трансформатора ТДЦ-250000/220, произошедшее вследствие разрушения прессующей конструкции под воздействием осевых сил.

На рисунке 9 показано полегание провода регулировочной обмотки трансформатора АТДН-167000/500/220.

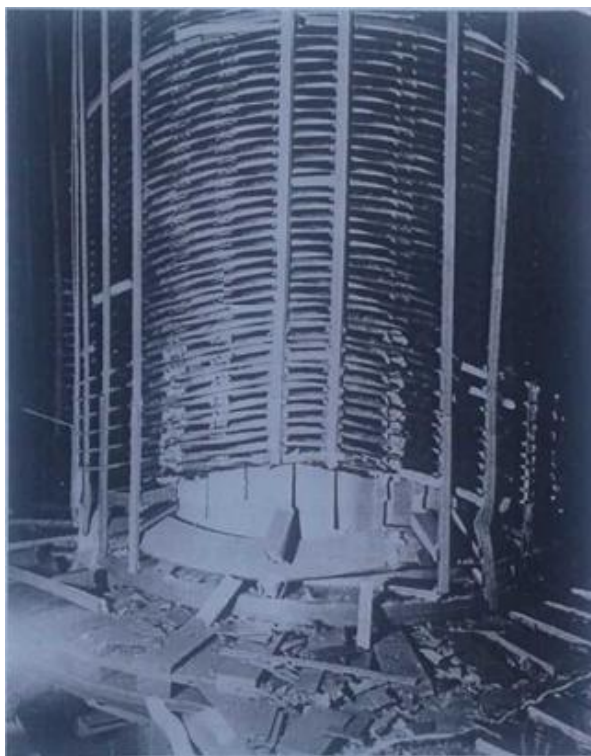


Рисунок 7- Деформация обмотки НН под воздействием осевых сил



Рисунок 8- Деформация (распушение) верхних витков обмотки НН под воздействием осевых сил



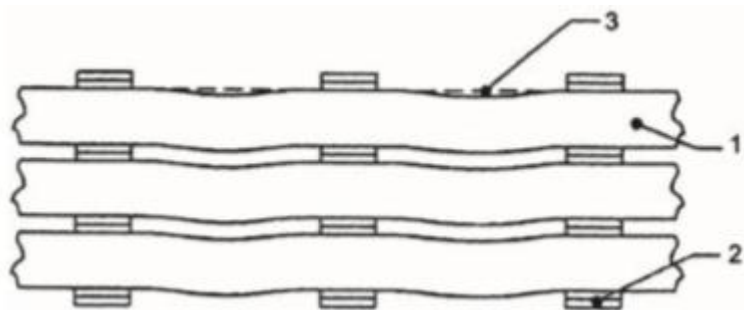
Рисунок 9- Деформация (полегание провода) регулировочной обмотки

Если рассмотреть обмотку в виде витков, опирающихся на прокладки (см. рисунок 10) то на виток, через который проходит максимальная индукция B_x , действует осевая сила (2)

$$F = \bar{2} \cdot I_k \cdot B_x, \quad (2)$$

где I_k – ток короткого замыкания;

B_x – максимальная индукция.



1- проводники; 2- прокладки; 3- прогиб

Рисунок 10- Действие изгибающих сил

В точке приложения осевой силы возникает максимальное механическое напряжение изгиба σ_{oc} , [МПа]:

$$\sigma_{oc} = \frac{K_{уд}^2 * \bar{2} * B_{x,max} * I_k}{2 * h * S} * \left[\frac{\pi D}{c_n} - b_n \right]^2 \quad (3)$$

где h – осевой размер обмоточного провода;

S – площадь поперечного сечения обмоточного провода;

$B_{x,max}$ – индукция, соответствующая току короткого замыкания;

b_n – ширина дистанцирующей прокладки;

c_n – количество столбов прокладок по периметру катушки;

D – среднее значение диаметра катушки;

$K_{уд}$ – ударный коэффициент;

$\left(\frac{\pi D}{c_n} - b_n \right)$ – расчетная длина, на которую воздействует осевая сила.

На обмотку, как сложную механическую систему, воздействуют ключевые осевые силы, требующие своего определения при расчете на динамическую стойкость:

- осевая сила в нижней опоре обмотки $P_{низ}$;
- осевая сила в верхней опоре обмотки $P_{верх}$;
- максимальная осевая сила действующая на витки обмотки P_{max} ;
- сила опрессовки обмоток P_0 , достаточной для противодействия осевым силам;
- максимальное давление (наибольшая сила сжатия проводов внутри катушки обмотки) σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{S_0} \quad (4)$$

где S_0 – площадь контактной поверхности прокладок.

Критические значения σ_{max} , превышение которых приводит к полеганию обмоток, представлены на рисунке 11.

Кроме показанных, у трансформатора, из-за действия осевых сил, возможны также следующие повреждения:

- повреждение домкратов, прессующих винтов;

- погнутость прессующих колец;
- разрушение концевой изоляции;
- деформация прессующих балок.

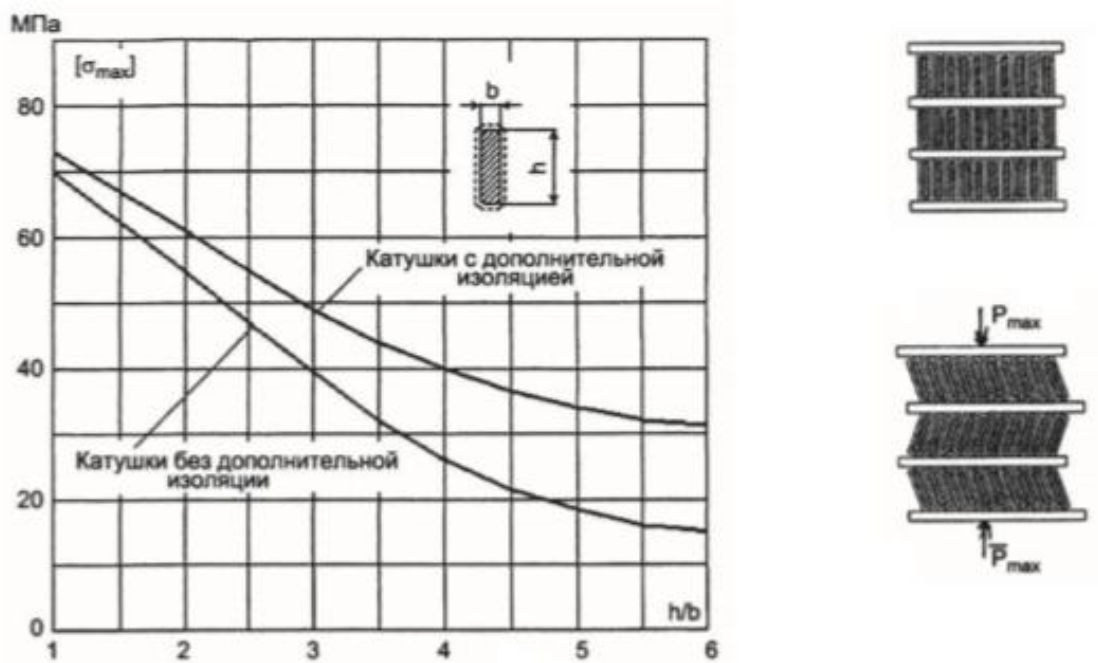


Рисунок 11- Критические значения $\sigma_{\max}$

Рассмотрим примеры воздействия радиальных сил.

На рисунке 12 изображено одно из возможных воздействий механических радиальных сил – нелинейное сжатие по всей длине наружной обмотки к диаметру обмотки ВН трансформатора АТДЦТНГ-125000/220/110. Проведенные замеры показали повышение сопротивления короткого замыкания в режиме ВН-НН на $\Delta Z_k = +6.64\%$, а в режиме СНном-НН на $\Delta Z_k = +12.62\%$.

На рисунке 13 показано скручивание винтовой обмотки НН трансформатора ТЦ-100000/330 (потеря прочности). Из рисунка 13 видно, каким именно образом происходит воздействие радиальных сил: направление действия сил происходит в соответствии с правилом правого винта, верхняя часть обмотки смещается (закручивается) вправо, нижняя часть обмотки смещается (закручивается) влево.

На рисунке 14. показан результат потерей обмоткой устойчивости под действием радиальных сил.



Рисунок 12- Нелинейное воздействие на наружную обмотку вследствие действия радиальных сил



Рисунок 13-Смещение винтовой обмотки НН трансформатора ТЦ-100000/330
под воздействием радиальных сил

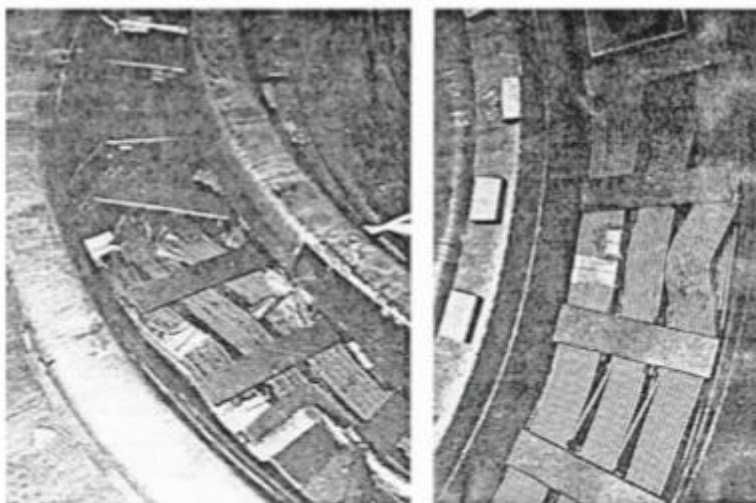


Рисунок 14- Потеря обмоткой устойчивости под действием радиальных
сил

В общем случае результат воздействия радиальных сил поясняется рисунком 15. Радиальный изгиб проводников происходит в пролетах между рейками.

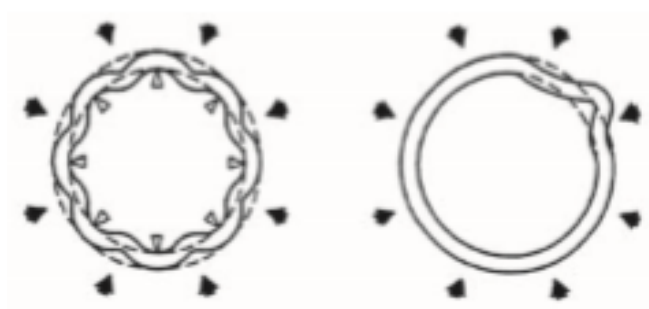


Рисунок 15- Направление воздействия радиальных сил

Величина радиальной силы q , [Н], стремящейся растянуть наружную обмотку (см. рисунок 16), определяется по формуле (5)

$$q = I_{уд} * w_k * B_y * K_{уд} * \sqrt{2} \quad (5)$$

где $I_{уд}$ – ударный ток;

w_k – число витков катушки;

B_y – индукция осевого поля;

$K_{уд} * \bar{2}$ – ударный коэффициент.

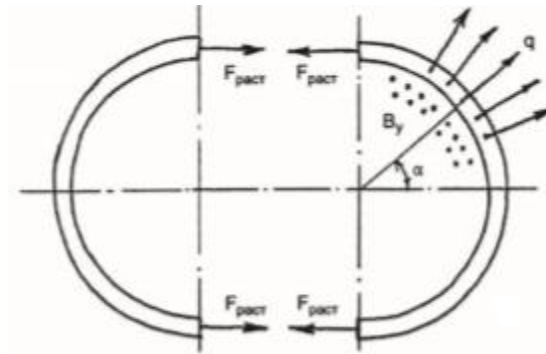


Рисунок 16- Направление действия радиальной силы

Сила растяжения $F_{раст}$, [Н], определяется уравнением равновесия:

$$2F_{раст} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} q * 0.5 * D * \cos \alpha d\alpha = D * S * \sigma_{ср} \quad (6)$$

где S – сечение проводников катушки;

$\sigma_{ср}$ – среднее напряжение растяжения проводников, распределяемая по обмотке неравномерно (см. рисунок 17) – максимальное на внутреннем витке, и минимальная на внешнем витке.

Распределение электромагнитной нагрузки по проводам катушки показано на рисунке 18.

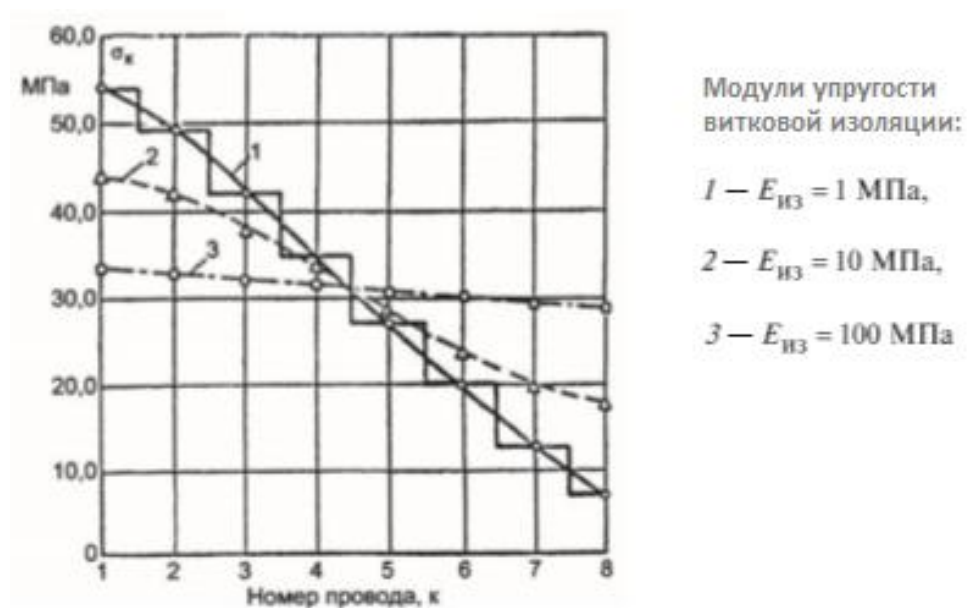


Рисунок 17- Среднее напряжение растяжения проводников

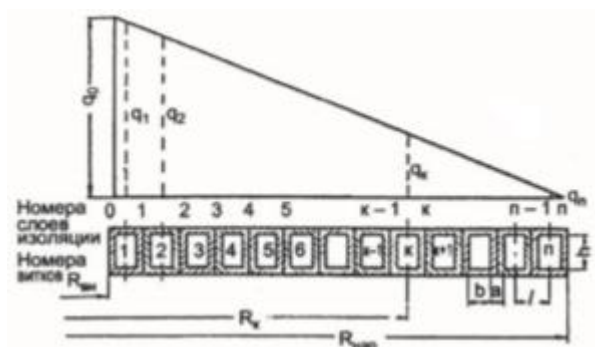


Рисунок 18- Распределение электромагнитной нагрузки по проводам катушки

Кроме показанных, у трансформатора, из-за действия радиальных сил, возможно также следующее повреждение - волна радиальных деформаций вдоль почти всей высоты обмотки, возможные пробой диэлектрика внутри обмоток, механические повреждения изоляции, элементов креплений и т.д [14].

Рассмотрим примеры воздействия тангенциальных сил.

На рисунке 19 показан поворот всей обмотки НН вокруг своей оси трансформатора ТДЦ-520000/220-УХЛ1 из-за воздействия тангенциальных сил.

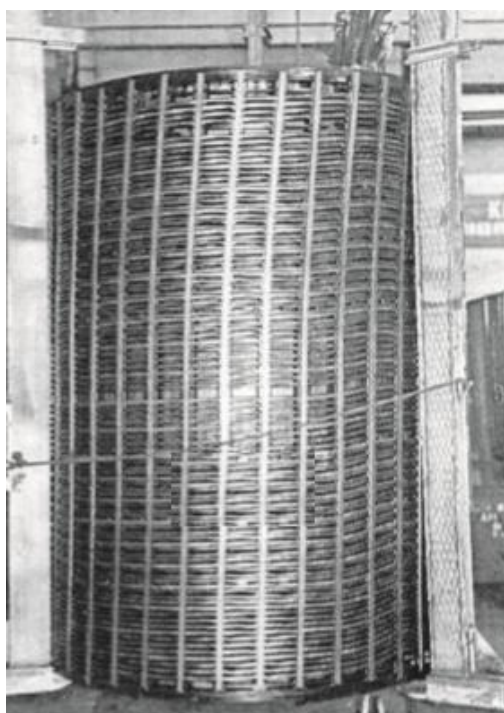


Рисунок 19- Полное смещение обмотки НН по наружному радиусу
обмотки трансформатора ТДЦ-520000/220-УХЛ1

Неисправности обмоток трансформатора из-за действия тангенциальных сил:

- изгибы и повороты крайних витков отдельных катушек обмоток и переходов между ними;
- тангенциальные перемещения (одновременно скручивание и поворот) обмотки или её отдельных катушек;
- изгибы и перемещения горизонтальных и вертикальных отводов, вследствие чего происходит их натяжение, контакт с прессующими кольцами и другими деталями;
- скручивание или раскручивание обмотки.

На рисунке 20 показаны образуемые токами короткого замыкания тангенциальные силы F_τ и вызывающие их токи I и индукции B [15].

Для примера рассмотрим формулу для определения тангенциальной силы, действующую на горизонтальную часть верхнего отвода:

$$F_{\tau, \text{г.отв.верх}} = B_{y, \text{верх}} K_T K_{уд} I_{уд} L_{\text{г.отв.верх}} \quad (7)$$

где $B_{y, \text{верх}}$ – средняя величина осевой составляющей индукции по длине отвода;

$L_{\text{г.отв.верх}}$ – длина отвода;

K_T – кратность току.

В общем виде тангенциальная сила определяется по формуле (8) [16]

$$F_\tau \Delta y = B_{x, \text{ср}} * I * \Delta y, \quad (8)$$

где I – ток короткого замыкания;

Δy – высота рассматриваемой части обмотки;

$B_{x, \text{ср}}$ – средняя индукция на отрезке Δy (9)

$$B_{x, \text{ср}} = \frac{1}{\Delta y} \int_y^{y+\Delta y} B_x y \, dy \quad (9)$$

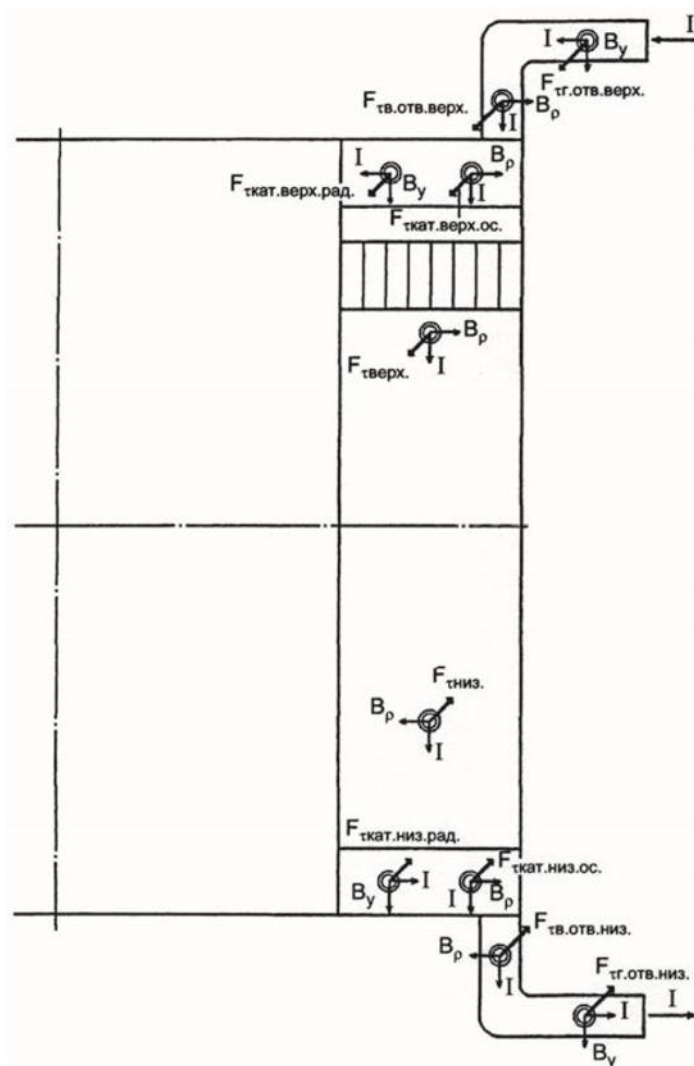


Рисунок 20- Тангенциальные силы КЗ, воздействующие на отводы и обмотку

1.4 Анализ статистических данных по повреждениям трансформаторов токами короткого замыкания, определение наиболее часто повреждаемых трансформаторов

Силовые трансформаторы, несмотря на достаточно высокую надёжность, выходят из строя по разным причинам. В среднем в год отказывают 150-200 электрических машин разной мощности. Например, в 2001 году из строя вышло 141 трансформатор (см. таблицу 1) [12]

Таблица 1- Классификация отказов трансформаторов по мощности и напряжению

Мощность трансформаторов, кВА	Количество отказов					Всего отказов
	Напряжение трансформаторов, кВ					
	До 35	110-150	220	330	400-500	
2500-7500	10	8	-	-	-	18
10000-80000	3	44	8	-	-	55
Более 80000	-	10	30	11	17	68
Итого	13	62	38	11	17	141

В таблице 2 показана статистика по причинам выхода трансформаторов из строя за 2001 год.

Таблица 2- Причины отказов трансформаторов

Мощность трансформаторов, кВА		Количество отказов										Всего отказов
		Недостаток эксплуатации	Дефекты ремонта	Недостатки хранения и монтажа	Недостатки проектирования	Дефекты конструкции и сборки	Изменение свойств материалов	Атмосферные воздействия	Нерасчетных режимов в сети	Посторонних воздействий	Неустановленных причин	
2500-7500		1	1	-	1	9	3	1	-	-	2	18
10000-80000		7	1	1	-	18	8	1	5	2	12	55
Более 80000		9	2	7	1	29	5	1	2	1	11	68
Итого	Кол.	17	4	8	2	56	16	3	7	3	25	141
	%	12.1	2,8	5,7	1,4	39,7	11,3	2,1	5,0	2,1	17,8	100

В таблице 3 представлены статистические данные за 2001 год по элементам конструкции, из-за которых трансформатор прекращал работу. Как видно из таблицы 3, с повышенными токами (возможно вследствие воздействия токов КЗ) связаны примерно 45,9%.

Таблица 3- Классификация отказов трансформаторов по элементам конструкции

Мощность трансформаторов, кВА		Поврежденные элементы конструкции							Количество отказов без повреждения узла	Всего отказов
		Обмотки и изоляция	Переключатели		Бак и его арматура	Радиаторы охлаждения	Вводы	Прочие узлы		
			РПН	ПБВ						
2500-7500		29	6	9	12	1	18	3	10	88
10000-80000		34	27	3	13	6	23	6	23	135
Более 80000		10	9	-	9	3	25	2	9	67
Итого	Кол-во	73	42	12	34	10	66	11	42	290
	%	23,2	14,5	4,1	11,7	3,4	22,7	3,8	14,5	100

Наибольшее количество разрушений, зафиксированных после отключения трансформатора вследствие возникновения в сети короткого замыкания, приходится (в порядке уменьшения) на автотрансформаторы 220, 330, 500 кВ трехфазной мощностью до 500 МВ×А, а именно АТДЦТН200000/330/110, АТДЦТГ-240000/ 220/110, АТДЦТГ-240000/330/220, АОДЦТН-167000/500/220; блочные трансформаторов 400 МВ×А на 220, 330, 500 кВ и 1000 МВ×А/330 кВ; наиболее крупных однофазных автотрансформаторов, в том числе 267 МВ×А/ 330 кВ и 333 МВ×А/750 кВ. [17]

Самым ненадежным трансформатором является трансформатор ТДЦ-125000/110, средний срок службы до отказа которого составляет 15,5 лет. Причиной этого является повышенная вибрация металлоконструкций, ненадежная работа переключателей ПБВ, перегрев верхних слоев масла и ускоренное старение изоляции обмоток. Из менее мощных трансформаторов наименьшей надежностью отличается трансформатор ТДН10000/220. Причиной этого является недостаточно глубокая проработка конструкции с точки зрения динамической стойкости при коротком замыкании.

1.5 Выводы по главе 1

Таким образом, проблема динамической устойчивости трансформатора является одной из важнейших задач, которую пришлось решить и приходится решать в настоящее время конструкторам трансформаторов. Ещё раз выделим возможные неисправности обмоток силового трансформатора от воздействия токов КЗ:

- появление механических сил под воздействием электромагнитных сил, действующих в осевом направлении, вызывает появление остаточных деформаций;
- возникновение механических сил при воздействии электромагнитных сил, действующих в радиальном направлении, вызывает появление в обмотках остаточных деформаций;
- повышенные значения электромагнитных сил, могут вызвать механические силы, достаточные для того чтобы проводники обмоток преодолели конструкционную изоляцию и вызвали полегание провода;
- перемещение проводников обмотки вдоль радиуса наружной поверхности в обоих направлениях из-за приложения тангенциальных сил;
- незначительное осевое вращение;
- если механические силы повреждают прессующую конструкцию, возможно распушение крайних (наружных) витков обмотки;

- если механические силы повреждают межвитковую, межслойную изоляцию или изоляцию самих проводов, то возможно возникновение витковых замыканий.

Возникновение деформаций обмоток вследствие воздействия механических сил возникающих под действием электродинамических сил описывается законом Ампера:

$$F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin\alpha, \quad (10)$$

где I –обмоточный ток;

l –расстояние, на которое воздействует магнитная индукция;

B - магнитная индукция;

$\sin\alpha$ - синус угла между векторами магнитной индукции и тока.

Материалы, рассмотренные и проанализированные в первой главе, показывают сложность и многогранность проблемы электродинамической стойкости силовых трансформаторов. Для принятия конструктивных мер по повышению электродинамической стойкости, необходимо тщательным образом рассмотреть процессы, возникающие и протекающие в трансформаторе, при протекании через него токов короткого замыкания. Большое значение также имеет анализ предыдущих разработок, конструкций трансформаторов, методик проектирования и расчетов с точки зрения определения электродинамической стойкости. Только комплексный подход к проблеме электродинамической стойкости позволяет снизить аварийность трансформаторов и тяжесть последствий после аварий.

Переход на современные экономические модели в определенной степени усложнил оценку электродинамической стойкости трансформаторов. Это связано с тем, что высокая стоимость натурных экспериментов, их доступность, в том числе транспортная, всегда не выгодна как производителям трансформаторов, так и потребителям, которые в конечном итоге «оплачивают» данные испытания. Большую роль в этой ситуации играют модельные испытания и компьютерные расчеты. Именно расчетные программы уже на стадии проектирования могут указать на проблемы, которые могут возникнуть

у трансформатора, при протекании через его обмотки токов короткого замыкания. Но для этого, конечно, программное обеспечение должно быть соответствующего высокого уровня и обладать высокой сходимостью расчетных данных с проверочных экспериментом (или наоборот). Всё это позволит повысить электродинамическую стойкость трансформатора ещё в начале его жизненного цикла а значить и продлить его жизнь на подстанции.

Стойкий к коротким замыканиям трансформатор должен обладать следующими свойствами:

- иметь прочную механическую конструкцию;
- проектироваться на основе фундаментальных законов механики;
- подвергаться множеству тестов на короткое замыкание;
- иметь прочную конструкцию закрепления сердечника, чтобы хорошо переносить короткие замыкания и транспортирование;
- сборка должна выполняться очень точно в условиях строгого контроля допусков и качества;
- иметь прочные каркасы обмоток;
- подвергаться проверенным процедурам сушки и опрессовки;
- иметь прочную конструкцию низковольтной обмотки и креплений.

Возможные конструкционные причины, повышающие воздействие механических сил при КЗ:

- использование в обмотках реек разных размеров;
- использование неконцентрического витка внутренней обмотки;
- неравномерным и неплотным прилеганием витков в радиальном направлении;
- местными изгибами проводника и т.д.

2 Оценка параметров электродинамической стойкости обмоток силовых трансформаторов

2.1 Критерии оценки электродинамической стойкости, методы расчета

С распространением электронной вычислительной техники и персональных компьютеров проектирование трансформаторов перешло в автоматизированную плоскость. Это касается и расчетов динамической стойкости трансформаторов. Изначально на базе методик и алгоритмов ВЭИ была разработана программа РЭСТ (расчет электродинамической стойкости трансформаторов). Для её создания была использована как теоретическая база, так и многолетние наблюдения и экспериментальные исследования. Затем была разработана программа РСТ (разработчик ВИТ), ELDINST (см. таблицы 4 и 5), TERMS_EDS, и др.

Таблица 4- Результаты расчета без учета влияния на обмотки токов короткого замыкания

Модель трансформатора/ дата расчета/ страна-изготовитель	Мощность, МВА/ число фаз	Место проведения испытаний	Результат	
			расчета	испытаний
1	2	3	4	5
ТДЦ-400000/220/ 2005, Россия	400/3	СССР	У обмотки НН возникло от нормы радиальной устойчивости	У обмотки НН возникло от нормы радиальной устойчивости

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5
ОДЦНП- 175000/750/ 2005/Россия	175/1	СССР	Потеря радиальной устойчивости обмотки СО	Потеря радиальной устойчивости обмотки СО
ТРДН- 80000/110/ 2007/Россия	80/3	СССР	У обмотки ВН возникло полегание верхнего слоя обмотки	Во всех фазах наблюдается полегание проводов обмотки ВН
ТЦ-667000/500/ 2005/Россия	667/3	СССР		
ТРДН- 40000/161/ 2007/Россия	40/3	СССР	Прессующая конструкция ННне обладает запасом прочности	Прессующая конструкция НН не обладает запасом прочности
ОНДЦНП- 320000/750/ 2008/Украина	320/1	СССР	Электродина- мическая стойкость обеспечена	Испытания положительные, деформаций обмоток нет
70MVA 400/ 13,8 kV/2009/ Франция	70/1	Голландия		
ТМ- 1000/10/2006/Ук раина	1,0/3	Украина		
ТДН-63000/154/ 2005/Украина	63/3	Голландия		
ТМ-400/10/	0,4/3	Украина		

2006/Украина				
--------------	--	--	--	--

Таблица 5- результаты испытаний трансформаторов, спроектированных в программе ELDINST

Модель трансформатора/ дата расчета/ страна-изготовитель	Мощность, МВА/ число фаз	Место проведения испытаний	Результаты расчета	Результаты испытаний
1	2	3	4	5
SFFZ10-31500/110/ 2008/ КНР	50/1	Китай	Электродинамическая стойкость обеспечена	Деформаций обмоток нет.
17,5MVA, 132/11kV/2007/ Индия	17,5/3	Индия		Испытания прошли.
250MVA, 420A/3/20kV/ 2009-2010/ Великобритания Франция	250/3	Голландия		
32MVA,220/11kV/ 2009/ Индия	32/3	Индия		
105MVA, 400/220/33kV авто трансформатор/ 2011/ Индия	105/3	Голландия		
80MVA, 400/11,5kV/2009/ Индия	80/3	Индия		
315MVA,	315/3	Голландия		

400/220/33kV авто трансформатор/ 2010/ Индия				
--	--	--	--	--

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5
ТРМГТ-1000/10/ 05.2005/Украина	1,0/3	Украина	Электродинамическая стойкость обеспечена	Деформаций обмоток нет.
200MVA, 420/132kV автотрансформатор/ 2010/Индия	200/3	Голландия		Испытания прошли.
25MVA, 420/11kV/2007/ Индия	25/3	Индия		
200MVA, 420/21 kV/2009/ Индия	200/3	Голландия		
102MVA, 400/16kV/2007/ Индия	102/3	Голландия		

Из таблиц 4 и 5 видно, что результаты расчетов совпадают с результатами испытаний и эксплуатации. Это подтверждает возможность использования ПМК ELDINST для проектирования трансформаторов.

Известны результаты расчетов и испытаний трансформаторов I и II габаритов на электродинамическую стойкость (см. таблицу 6). При составлении таблицы 6 были приняты следующие допущения: максимальные значения токов для теоретических расчетов были взяты из результатов натурных испытаний; в расчетах принято, что не симметрия регулировочных витков обмоток ВН отсутствует; проектные и физические опорные площади внутреннего слоя обмотки ВН совпадают. [19]

Таблица 6- Результаты расчетов и испытаний трансформаторов I и II габаритов на электродинамическую стойкость

Типо-размер	Результаты осмотра трансформатора перед испытаниями	Несимметрия регулировочного слоя обмотки ВН		Максимально напряженность концевой изоляции		Кол-во КЗ, котыр подвешен при испытании	Результаты осмотра трансформатора после динамических испытаний	Примечания
		Фаза	$h_1, \%$	Фаза	$\sigma, \text{кг/см}^3$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
560 кВА, 10/0,4 кВ	Без замечаний	А В С	35 19,5 19,5	А В С	268 223 130	1 (при $0,8U_H$)	Обмотка НН фазы А сместилась вверх и замкнулась на верхнее ярмо. Разрушилась концевая изоляция. В фазе В обмотка	-

							НН сместилась вверх на 10 мм	
320 кВА, 10/0,4	Имелся зазор 7 мм между	A B C	30 14 17	A B C	207 83 110	3 (при U_H)	Разрушилась концевая изоляция	-

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
кВ	верхними торцами обмотки и ярмовы- ми проклад- ками в фазе А.						обмотки НН фазы А	
560 кВА, 10/0,4 кВ	В фазах А и С об- мотки запрес- сованы неравно- мерно, имеются зазоры между торцами обмоток и проклад-	A B C	22,7 15 12,4	A B C	177,5 121 63	2 (при $0,65U_H$)	В фазах А и В обмотки НН сместились вверх до упоров в ярмо, разрушилась их концевая изоляция	Качест- во уравни- тель- ных бак ели- товых колец низкое, они разру- шились при

	ками							$\sigma < 200$ кг/см ³
320 кВА, 10/0,4 кВ	Во всех фазах имеются зазоры	A B C	7,8 6,0 2,2	A B C	148 131 102	5 (при U _H)	Обмотки НН во всех фазах сместились вверх на	Оста- точные дефор- мации

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	между торцами обмоток ННи ярмовой изоляция						10-12 мм за счет зазоров и неплотной намотки, но без разрушений обмотки	прои- зошли из-за неплот- ной намот- ки обмо- ток и низкого качест- ва сборки
320 кВА, 10/0,4 кВ	-	A B C	10 10 10	A B C	50 72 41	6 (при U _H)	Разрушений нет	Конст- рукция модер- низиро- вана, площа- ди опор увели-

							чены
320 кВА, 10/0,4 кВ	-	Регулиро- вочные витки обмоток ВН расположены симметрично	Не превышало 30 кг/см ²	5 (при U _Н)	Разрушений нет	-	

Алгоритм расчета электродинамической стойкости в программе РЭСР показан на рисунке 21.



Рисунок 21- Алгоритм расчета электродинамической стойкости в ПО РЭСР

Используя данный алгоритм были проведены расчеты силовых двухобмоточных трансформаторов мощностью 40 и 125 МВ*А и трехобмоточного 40 МВ*А напряжением 110 кВ. Целью расчета было сравнение расчетных данных с результатами испытаний действующих моделей трансформаторов. Также выполнено сравнение алюминиевых обмоток с медными с точки зрения электродинамической стойкости. Алюминиевые обмотки показали лучшую электродинамическую стойкость. Результаты расчета остальных показателей сведены в таблицу 7.

Таблица 7- Результаты расчета трансформаторов в ПО РЭСР

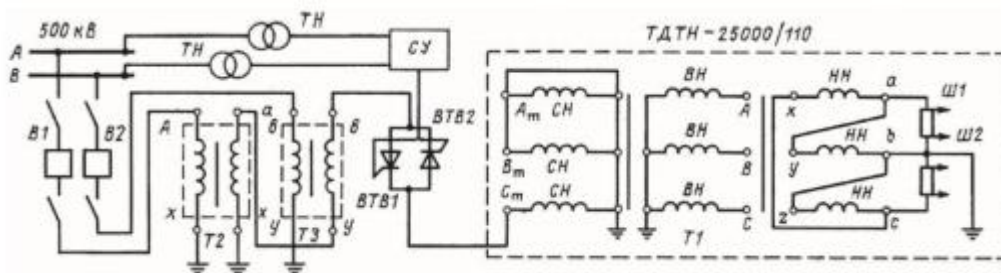
Показатель		Величина		
		ТД- 4000/110	ТДЦ- 125000/110	ТДТН- 40000/110
1		2	3	4
Размеры бака, мм	Н	3775	3780	4200
	В	1590	2430	1890
	L	4290	7260	5300
Высота, мм	магнитопровода	3645	3670	4090
	окна	2485	2205	3070
	обмотки	2250	1950	2770
Число витков в обмотке НН		121	90	89
Межосевое расстояние, мм		1230	2145	1355
Диаметр стержня, мм		600	800	530
Масса, т	масла	16,7	40	31
	металла обмоток	4,89	19,07	7,86
	бака	10,5	15	8,4

электротехнической стали				26,53	52,9	25
Потери ХХ, кВт				41,6	90,4	43,1
Потери КЗ, кВт				166	384,4	194
$\epsilon_k, \%$				10.2	10.3	10.3
Общая сила осевой прессовки обмотки, кН				784	-	-
Радиаль- ные	растя- жения	$\sigma_{cp}, \text{ МПа}$	СН	-	-	22,7
			ВН	21,1	24	18

Продолжение таблицы 7

1				2	3	4
напряжения		$K_{зап} = \frac{\sigma}{\sigma_{cp}},$ отн.ед.	СН	-	-	1,10
			ВН	1,18	1,04	1,39
	сжатия	$\sigma_{кр},$ МПа	СН	-	-	16,7
			НН	19,8	35,1	17,4
		$\sigma_{кр},$ МПа	СН	-	-	19,0
			НН	13,7	19,8	18,2
		$K_{зап} = \frac{\sigma}{\sigma_{cp}},$ отн.ед.	СН	-	-	0,88
			НН	1,45	1,77	0,96

Для проверки адекватности методики расчета электродинамической стойкости, заложенной в ПО РЭСР, был выполнен расчет трансформатора ТДТН-25000/110 для фазы С, результаты которого были сравнены с результатами натурных испытаний этого же типа трансформаторов (см. рисунок 22, таблицу 8).



Т1- испытываемый трансформатор; Т2, Т3- промежуточные трансформаторы;
В1, В2- воздушные выключатели; ВТВ1, ВТВ2- высоковольтные тиристорные
вентили; СУ- система управления ВТВ; ТН- трансформатор напряжения; Ш1,
Ш2- измерительные шунты

Рисунок 22- Схема испытаний фазы С трансформатора ТДТН-25000/110 в
режиме СН–НН

Таблица 8- Результаты расчета и испытания фазы С трансформатора ТДТН-
25000/110 в режиме СН–НН

Режим	Обмотка	Ударный ток КЗ, кА		Установившийся ток КЗ, кА	
		Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
СН _{min} -НН	СН	9.45	9.58	3.50	3.52
	НН	17.8	18.5	6.56	6.8
СН _{max} -НН	СН	8.72	9.04	3.36	3.52
	НН	18.20	19.16	7.1	7.45
СН _{min} -ВН _{min}	ВН	3.45	3.58	1.36	1.38
	СН	9.39	9.47	3.46	3.65
СН _{min} -ВН _{max}	ВН	2.36	2.45	0.91	0.95
	СН	9.13	8.97	3.40	3.46
СН _{min} -ВН _{max} -НН	ВН	1.5	1.43	0.59	0.55
	СН	13.7	13.9	5.45	5.34
	НН	16.6	16.91	6.87	6.47
СН _{max} -ВН _{max} -НН	ВН	1.48	1.43	0.61	0.54
	СН	12.8	12.71	5.28	4.83
	НН	16.3	16.92	6.6	6.43

ООО «Тольяттинский трансформатор» использует в своей работе преимущественно программное обеспечение разработанное ОАО «ВИТ». Для

создания собственных программных продуктов ОАО «ВИТ» использовал наработки по расчетам и испытаниям силовых трансформаторов в 1960-1980 годах прошлого века. В эти временные отрезки происходил «бурный» рост трансформаторостроения, совершенствовалась как конструкция самого трансформатора, так и методы его испытания. Были разработаны как малые так и крупные модели трансформаторов (см. рисунок 23 и 24), позволившие создать документацию, в которой была отражена методика проектирования и расчета трансформатора.



Рисунок 23- Модель автотрансформатора 1800 кВ в масштабе 100%:
длительное напряжение 1425 кВ, грозовой срезанный импульс 3200 кВ,
импульс коммутационный 2600 кВ, грозовой полный импульс 3200 кВ



Рисунок 24- Испытательная установка ВГИна 1150 кВ

В середине прошлого столетия электронные вычислительные машины ещё не получили такого развития, чтобы на них можно было решать серьёзные инженерные задачи. Поэтому обработка информации была ручной, и не позволяло получить критериальные уравнения с целью получения коэффициентов теплоотдачи и дальнейшего расчета поля температур обмоток, что снизило точность расчетных данных. [20]

Используя накопленный собственный и зарубежный опыт ОАО «ВИТ» разработал собственную линейку программных продуктов, которые можно использовать при проектировании трансформаторов (см. таблицу 9).

Таблица 9- Линейка программных продуктов ОАО «ВИТ»

Программа производства ОАО «ВИТ»	Зарубежный аналог	Область применения	Примечание
1	2	3	4
TRANSMAG-	FLUX,	Исследование	Программы

2D, EDMAG-3D, MPO, HLEAD-2D, POB in SAPR-TON	ANSOFT-MAXWELL, ANSYS-EMAG, INFOLYTICA-MAGNET	магнитного поля, потерь рассеивания, превышение температур элементов конструкций, анализ вихревых токов, в том числе HVDC трансформаторов	общего назначения, слабо адаптированы к проектированию трансформаторов, но хорошо исследуют в общем виде электрические, магнитные и тепловые поля
SAPR TON, TOK, SRD	-	Стандартные расчеты, в том числе расчеты потерь, импедансов, тепловые расчеты	-

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4
PRT, SRD	-	Предварительные тендерные расчеты, выбор рабочего варианта	Узкоспециализированные программы, разработанные с учетом пожеланий трансформаторостроителей
COILINS	-	Расчет коэффициентов запаса продольной изоляции	-
VLN	-	Анализ процессов в изоляции при испытании ПГИ, КИ, СГИ, FW	Узкоспециализированная программа, отличающаяся повышенной

			точностью в своей области
ANSYSснабор ом макрокоманд собственной разработки	ANSYS	Структурный анализ	-
EPC in SAPR- TON, DCI,ELAX-2D (BUSHING, ENDINS, MIDINS, NURNINS),	ANSYS- EMAG, ANSOFT- MAXWELL, INFOLYTICA	Анализ электрических полей	В том числе коэффициентов запаса, в том числе HVDC трансформаторов

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4
TPM, TPL, TPO, TEO, TRM in SAPR- TON	ANSYS, ANSOFT, INFOLYTICA	Термический анализ	Точность расчета ограничена только технической возможностью ЭВМ
VLN. Также используется NAP2 и версия EMPT- RV	EMPT, ATP, NAP2, PSPICE	Анализ переходных режимов в электрических сетях	Расчет переходных процессов, расчет перенапряжений, содержат встроенные модели трансформаторов

Технические возможности некоторых испытательных лабораторий большой мощности показаны в таблице 10, а их испытательные возможности – в таблице 11. [21]

Таблица 10- Технические возможности некоторых испытательных лабораторий большой мощности

Показатель	ОАО «ВИТ», Украина	KemaTesting, Голландия	CESI, Италия	ABB Power, Швеция	EDF, Франция	CPRI, Индия	Korea Electro Tech, Корея	CERDA, Франция	RENLA, Германия
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Максимальная мощность, МВа	-	8400	3000	4000	6600	2500	4800	5000	8400

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Максимальное напряжение, кВ	-	450	225	250	420	245	288	440	483
Коммутационные испытания (используется синтетическая схема испытаний):									
- максимальный ток, кА	10	100	63	80	-	63	63	63	-
- максимальное	10	550	315	550	1000	245	550	550	575

напряжение, кВ									
Максимальный ударный ток (при испытании на электродинамическую стойкость), кА (пиковое значение)	200	-	-	-	-	-	-	280	560
Максимальный ток (при испытании на термическую стойкость), кА	100	390	63	100	130	300	110	100	300
Длительность, с	1	0,42	3	1	3	1	1	3	3
Количество рабочих	-	50	35	28	40	208	17	17	-

Таблица 11- Испытательные возможности некоторых испытательных лабораторий большой мощности

Показатель	ОАО «ВИТ», Украина	Kema Testing, Голландия	CESI, Италия	ABB Power, Швеция	EDF, Франция	CPRI, Индия	Korea Electro Tech, Корея	CERDA, Франция	RENLA, Германия
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Испытание									

переменным напряжением, кВ:									
- в сухом состоянии	2000	2100	1000	700	1050	1100	1100	1150	1800
- под дождём	1500	100	-	700	1050	950	1100	1150	1800
Измерение уровня частичных разрядов, кВ	800	1200	420	300	1050	700	-	1000	800
Коммутационный импульс, кВ:									
- в сухом состоянии	4000	2700	2600	1100	1750	2200	2700	5000	2400
- под дождем	2500	1600	-	1100	1750	-	2700	5000	2400
Испытание постоянным напряжением, кВ/мА:									
- в сухом состоянии	2500 /200	1200 /50	1000 /-	1600 /15	1250 /0,3	350/ 10	600/ 30	300/ -	1000 /-
- под дождём	-	1200 /50	1000 /-	1600 /15	1250 /0,3	-	600/ 30	150/ -	-

Продолжение таблицы 11

Грозовой импульс, кВ	5100	5000	2600	1500	2800	3800	3000	5000	4000
Измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, кВ	600	1200	420	500	1050	-	600	500	800
Измерение уровня радиопомех, кВ	800	1200	420	300	1050	700	-	1000	800
Количество	-	-	23	15	14	8	40	44	-

рабочих									
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

2.2 Описание электродинамической стойкости обмоток под воздействием осевых и радиальных электромагнитных сил

Для примера, в таблице 12, показан результат расчета осевых сил для пяти образующих обмоток НН трансформатора 1000 МВ*А.

Таблица 12- Трансформатор 1000 МВ*А. Результат расчета осевых сил для пяти образующих обмоток НН

Образующая	Прессовка		Максимальные				Верхняя опора		Нижняя опора	
	Сила, кН	Давление, МПа	Номер катушки	Сила, кН	Давление, МПа	Коэффициент запаса	Сила, кН	Коэффициент запаса	Сила, кН	Коэффициент запаса
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Концентр НН										

Продолжение таблицы 12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1/2	2689	12,4	60	9977	46,0	1,15	0	-	2000	5,72
1/4	2485	11,5	59	9459	43,6	1,21	0	-	974	11,74
Сред	2303	10,6	59	8999	41,5	1,27	54	-	0	-
-1/4	2512	11,6	58	9517	43,9	1,20	1081	10,58	0	-
-1/2	2722	12,5	58	10038	46,3	1,14	2108	5,43	0	-
Концентр ВН										
1/2	1123	3,9	11	5881	20,4	1,08	4882	0,50	2306	1,07
1/4	1112	3,9	11	5252	18,2	1,22	4207	0,58	2953	0,83

Сред	1105	3,8	101	4740	16,5	1,34	3538	0,70	3606	0,68
-1/4	1110	3,9	102	5355	18,6	1,19	2893	0,85	4284	0,57
-1/2	1119	3,9	102	5990	20,8	1,06	2252	1,09	4965	0,50

2.3 Описание тангенциальных сил, возникающих в обмотках

Пример величины тангенциальных сил (кН) в обмотках и отводах некоторых типов трансформаторов показаны в таблице 13. [22]

Таблица 13- Тангенциальные силы (кН) в обмотках и отводах

Тип трансформатора	Обмотка	Поворот обмотки	Скручивание обмотки		Поворот катушки	Поворот отводов			
			верх	низ		Горизонтальная часть		Вертикальная часть	
						верх	низ	верх	низ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ТЦ-1000000/ 330	НН2	-3,9	58,2	54,2	-4,8	6,1	6,3	41,9	-43,2
	ВН2	0,3	1,4	1,7	0,1	3,4	3,6	-0,2	0,3

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	НН1	-3,9	67,5	63,5	-4,9	47,1	49,2	29,8	-30,2
	ВН1	1,5	0,7	0,8	0,2	0,2	0,2	0,9	-1,0
ТЦ-1000000/ 500	ВН	1,0	0,5	0,5	-0,1	0,1	0,1	0,6	-0,6
	НН	7	117,9	118,6	9,2	43,3	43,1	26,6	-26,2
ТНЦ-630000/ 330	НН2	-12,4	74,3	61,9	4,7	1,4	1,3	31,6	-31,1
	ВН2	1,4	0,5	1,9	-0,2	3,2	3,8	0,4	-0,5

	НН1	-11,0	78,8	67,8	5,0	33,0	-31,0	22,9	-21,2
	ВН1	1,7	0,6	1,1	-0,1	0,2	0,2	0,7	-0,9
ТЦ- 666000/ 500	ВН	1,8	0,9	0,9	-0,1	0,0	0,0	0,4	-0,4
	НН	1,3	42,2	43,5	6,8	35,3	35,9	20,7	-20,9
ТДЦ- 400000/ 500	ВН	0,5	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
	НН	2,8	37,0	39,8	3,3	18,6	19,1	13,3	-14,0
ТДЦ- 400000/ 220	ВН	1,5	0,8	0,7	-0,1	0,0	0,0	0,5	-0,5
	НН1	1,4	38,7	40,1	5,1	12,8	13,1	20,0	-21,1
	НН2	1,5	32,8	34,3	4,2	25,3	26,2	13,7	-14,0
ОДЦНП- 320000/ 750	РО	0,0	1,5	1,5	0,1	0,1	0,1	0,4	-0,4
АОДЦТН -333000/ 750	ПО	1,2	0,6	0,6	0,1	0,0	0,0	0,3	-0,3
	ОО	0,1	3,3	3,4	-0,4	2,3	2,3	1,7	-1,7
	НН	-2,7	57,3	54,6	-5,3	21,3	20,9	15,6	-15,1

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ОДЦНП- 320000/ 400	РО	0,3	2,4	2,7	0,1	0,3	0,4	0,9	-1,0
ТДТН- 40000/110	ВН	0,8	0,5	0,3	-0,1	-0,1	0,1	0,2	-0,2
	НН	1,5	2,3	2,3	0,7	4,0	4,0	3,9	-3,9
	СН	0	1,4	1,4	0,2	1,9	1,9	0,9	-0,9

2.4 Выводы по главе 2

Для создания программ расчета электродинамической стойкости трансформаторов была использована как теоретическая база, так и многолетние наблюдения и экспериментальные исследования. К таким программам относятся программа РЭСТ, РСТ (разработчик ВИТ), ELDINST, TERMS_EDS, и др. Анализ доступных источников показал, что результаты расчетов совпадают с результатами испытаний и эксплуатации. ООО «Тольяттинский трансформатор» использует в своей работе преимущественно программное обеспечение разработанное ОАО «ВИТ», показавшее высокую сходимость результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

3 Разработка рекомендаций по повышению электродинамической стойкости обмоток силового трансформатора при коротком замыкании

3.1 Общие рекомендации по оптимизации электродинамической стойкости обмоток

В силовом трансформаторе, оптимизации подвергаются [23]:

- радиальные силы;
- осевые силы;
- тангенциальные силы;
- деформация;
- устойчивость и другие.

В качестве параметров оптимизации выбираются [30, 31, 32]:

- конструктивная проработка;
- нормируемые значения токов короткого замыкания;
- размеры элементов активной части;
- конструкционные материалы;
- технологический процесс производства;
- характер и виды воздействий;
- нагрев и другие.

Теоретически, при оптимизации возможно большое количество рекомендаций и их сочетания. В качестве примера одиночной оптимизации можно привести оптимальное распределение по высоте обмотки ампервитков, изменение изоляции обмотки, изменение расчетных коэффициентов, связанных с электродинамической стойкостью и т.д. [24]. Сочетание параметров оптимизации приводит как к положительным (например, при повышении сечения проводника обмотки повышается радиальная устойчивость и снижаются основные потери короткого замыкания), так и отрицательным результатам (например, при повышении сечения проводника обмотки повышаются добавочные потери).

К расчетам по оптимизации конструкции трансформаторов с точки зрения электродинамической стойкости прибегают в том случае, если первоначальный (чаще всего это поверочный) расчет выявил невыполнение какого-либо критерия стойкости. Объем расчетов зависит от множества факторов: конструкции обмоток, схемы соединений обмоток, очередности расположения обмоток на стержне, способа регулирования напряжения и т.д. Для оценки совершенства конструкции обмоток и их осевого строения, рекомендуется проводить следующие расчеты:

- изменяя силу прессовки, рассчитываются осевые силы по условиям радиальной устойчивости;
- путем осевого «смещения» расчетных сечений рассчитываются осевые силы на разных образующих винтовой обмотки;
- при одностороннем изменении высоты обмоток, рассчитываются осевые и радиальные силы, только для одного торца обмоток;
- сохраняя взаимную симметрию обмоток, при нескольких значениях высоты обмоток, оценивается влияние изменения высоты обмотки низшего напряжения на изменение осевых сил в обмотках высшего напряжения;
- для условно равномерного распределения плотности намагничивающей силы по высоте обмоток, рассчитываются осевые силы;
- для симметричного в электромагнитном отношении расположения обмоток, рассчитываются осевые силы.

Названные расчеты, рекомендуется выполнять с помощью специализированного программного обеспечения, например ДИНАР или RDO. После проведения оптимизационных расчетов, и внесения по их результатам изменений в конструкцию трансформаторов, рекомендуется повторно выполнить поверочные расчеты потерь в обмотках, расчет электрической прочности изоляции и температурные расчеты. В настоящее время, наиболее совершенны оптимизационные расчеты по осевым, радиальным и тангенциальным силам. Поэтому рассмотрим их подробно.

3.2 Оптимизация по стойкости к осевым силам

В таблице 14 приведены основные зависимости между электродинамической стойкостью и параметрами оптимизации осевых сил.

Таблица 14-Основные зависимости между электродинамической стойкостью и параметрами оптимизации осевых сил

Желаемый эффект	Параметры оптимизации	Объект оптимизации
1	2	3
Осевые силы в обмотке		
Повышение осевой устойчивости	Оптимальное расположение емкостных колец, регулировочных зон, разгонов	Максимальная сила в обмотке
	Симметрирование обмоток	
	Учет динамики	
	Уменьшение радиального поля	
Увеличение прочности ключевых узлов прессующей системы	Сила опрессовки	Сила на опорах
	Конструктивное строение системы опрессовки	
	Жесткость прессующих систем	
Снижение расхода конструкционных материалов	Взаимное расположение обмоток и их геометрические размеры	Сила прессовки
Осевые силы прессовки на стержень		
Уменьшение силы прессовки на стержень, обеспечение	Начальные зазоры между обмотками и общим прессующим кольцом	Силы прессовки на стержень

Продолжение таблицы 14

1	2	3
требуемой прессовки каждой обмотки		
Осевая устойчивость проводников на полегание		
Исключение внутренних коротких замыканий	Провода: размеры, материал, тип, марка, упрочнение, клейка	Устойчивость на полегание
	Прокладки: размеры, число столбов прокладок	
	Коэффициент запаса	
	Учёт динамики	
	Диаметр обмотки	
	Коэффициент запаса	

Рассмотрим основные способы оптимизации по осевым силам.

1. Оптимизация взаимного расположения обмоток и их геометрических размеров (статический расчет).

Основное влияние на осевые силы оказывает так называемая несимметрия. Различают её три основных вида:

- симметричная разновысокость (когда высоты обмоток разные, в действительности или по расчетам, а электромагнитные центры обмоток совпадают);
- несимметричная разновысокость (если только одна или две из всех обмоток ниже или выше);
- сдвиг обмоток (встречается очень редко, связан с ошибочной конструкцией концевой изоляции).

Из перечисленных трех несимметрий, на практике чаще всего встречается первый случай – симметричная разновысокость. Пример: с помощью программы РЭСТ в ВЭИ были проведены расчеты осевых сил в зависимости от разновысокости обмоток, для расчетной высоты обмотки низшего напряжения в 2794 мм, и высокого напряжения – 2860 мм (см. таблицу15)

Таблица 15- Результаты расчета осевых сил при оптимизации мощного силового трансформатора

Об-мотка	Разно-высо-кость НН, мм	P_0 , кН	σ_0 , МПа	Номер ка-тушки	$P_{\text{макс}}$, кН	$\sigma_{\text{макс}}$, МПа	Коэф-фици-ент запаса	$P_{\text{верх}}$, кН	Коэф-фици-ент запаса
НН	0	2349	10,8	59	9211	42,5	0,73	2,0	-
	60	2023	9,3	59	7943	36,6	0,85	1,0	-
	120	1711	7,9	59	6722	31,0	1,00	0,0	-
	180	1414	6,5	59	5550	25,6	1,21	0,0	-
	240	1133	5,2	59	4428	20,4	1,52	0,0	-
ВН	0	1149	4,0	102	4983	17,3	0,75	3877	0,37
	60	945	3,3	99	3956	13,7	0,95	2537	0,57
	120	752	2,6	94	3143	10,9	1,19	1235	1,17
	180	577	2,0	89	2630	9,1	1,42	-	-
	240	887	3,1	89	3440	11,9	1,09	-	-

Проанализировав таблицу 0 можно сделать следующие выводы:

- при изменении разновысокости НН от 0 до 240 мм (увеличение высоты обмотки на 8,5%), максимальная осевая сила $P_{\text{макс}}$ меняется с 9211 кН до 4428 кН (уменьшение на 48,8%);

- с увеличением высоты обмотки НН, осевые силы уменьшаются, но до определенного предела;

- оптимальным является вариант, представленный в четвертой строке таблицы – высота обмотки НН увеличена примерно на 180 мм. В этом случае осевые силы снижаются до такого значения, при котором коэффициент запаса становится больше единицы (выполняется условие осевой устойчивости основных и торцевых катушек обмотки высшего напряжения). Обмотка высшего напряжения из «растягиваемой» осевыми силами переходит в «сжимаемую», что соответствует оптимальному варианту. Дальнейшее увеличение высоты обмотки НН негативно сказывается на обмотке ВН – осевая сила в ней значительно увеличивается [25].

Выводы по оптимизация взаимного расположения обмоток и их геометрических размеров:

- главная цель: снизить осевые силы в обмотках;
- дополнительная цель: повысить коэффициент запаса по радиальной устойчивости;
- основными критериями оптимизации данного вида являются:
 - а) наибольшие значения коэффициентов запаса по радиальной устойчивости;
 - б) отсутствие односторонней несимметрии (это когда осевые силы $P_{\text{верх}}$ и $P_{\text{низ}}$ в одной обмотке существенно различаются). При её наличие значения этих сил не должны быть выше значения силы прессовки;
 - в) близкие (не более 30% различия) коэффициенты запаса по осевой устойчивости во всех обмотках;
 - г) минимальные значения осевых сил в обмотках и на опорах.

2. Оптимизация сил прессовки с учетом динамических колебаний (динамический расчет)

Для примера рассмотрим динамические колебания осевых сил, действующих на середину высоты обмотки низшего напряжения (см. рисунок 25). В момент появления короткого замыкания (точка 0, начало координат) на обмотку сначала начинает действовать электромагнитная сила (на 2 мс), динамическая сила запаздывает (пунктирная линия), причем

сильнее при отсутствии силы прессовки. Максимум сил наступает на 10, 11 и 12 мс соответственно. Видно, что в распрессованной обмотке, динамическая сила почти в 2 раза выше. Также, в распрессованной обмотке возникают отрезки времени (17-25 с, 37-46 с и т.д), когда динамическая сила сжатия равна нулю. То есть в середине обмотки в этом случае возможно появление зазора, что снижает радиальную устойчивость обмотки [26].

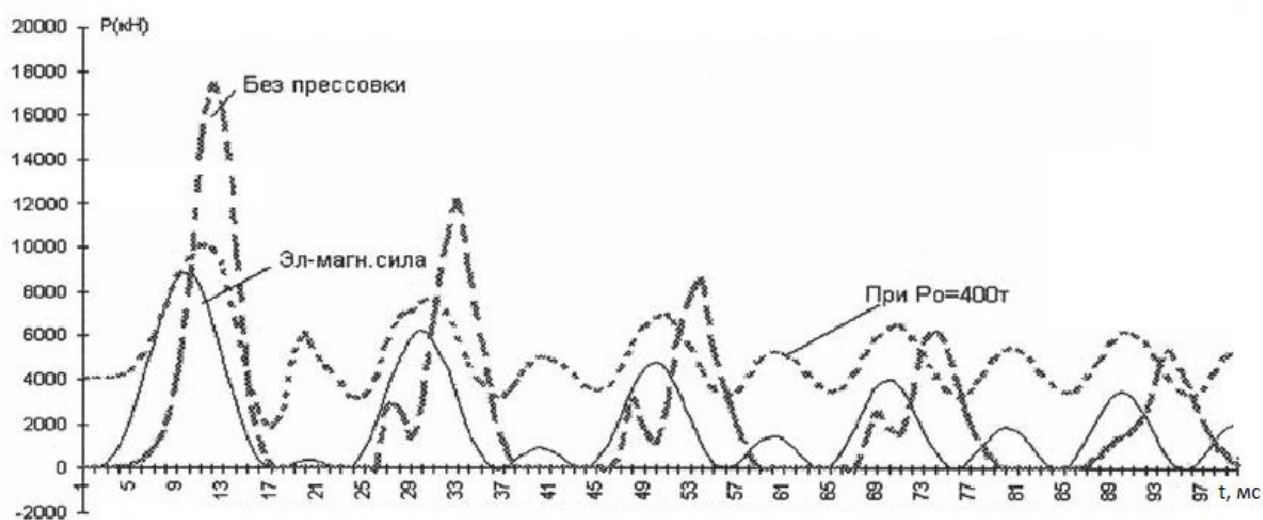


Рисунок 25- Динамические осевые силы в середине высоты обмотки НН

Данные расчеты по оптимизации также выполняются с помощью прикладного ПО ДИНАР и РДО. Особенностью данного расчета является учёт веса обмоток, сил инерции, сил внутреннего и внешнего трения, воздействие обмоток друг на друга и т.д. Для силового трансформатора, рассмотренного выше (см. таблицу15) расчет показал, что оптимальное значение силы опрессовки обмотки низшего напряжения составляет около 4000 кН. Ей соответствует:

- расчетная динамическая сила сжатия в середине высоты обмотки около 10000 кН (самое минимальное значение), что на 11% выше силы рассчитанной по статическому методу (около 9000 кН);
- динамическое перемещение крайних катушек не более 6 мм (против 30 мм у полностью распрессованной обмотки).

Если снизить силу опрессовки до 2000-2500 кН, происходит значительное увеличение осевых динамических сил (до 13000 кН) и перемещений (до 15 мм).

Выводы по оптимизации сил прессовки с учетом динамических колебаний:

а) главные цели данной оптимизации: проверить динамические воздействия на опорные конструкции, изоляцию и проводники обмотки; подобрать оптимальную силу прессовки;

б) основными критериями оптимизации данного вида являются:

- минимально допустимые значения осевых перемещений торцевых катушек и отводов;
- минимальные значения осевых сил, воздействующих на опорные конструкции;
- минимальные значения сжимающих осевых динамических сил.

3.3 Оптимизация по стойкости к радиальным силам

В таблице 16 приведены основные зависимости между электродинамической стойкостью и параметрами оптимизации радиальных сил [27].

Таблица 16-Основные зависимости между электродинамической стойкостью и параметрами оптимизации радиальных сил

Желаемый эффект	Параметры оптимизации	Объект оптимизации
1	2	3
Снижается возможность потери витком круглой формы (повышается радиальная	Провода: материал, тип, сечение, размеры, склейка, упрочнение	Радиальная устойчивость

Продолжение таблицы 16

1	2	3
устойчивость проводников)	Коэффициент запаса	
	Учет динамики	
	Силы трения	
	Пролеты	
	Качество и количество радиальных опор	
	Сила прессовки	
	Осевое давление	
Предотвращение снижения электрической прочности изоляционных промежутков	Учёт температуры провода	Радиальная прочность
	Учёт старения	
	Остаточные деформации	
Предотвращение: изгиба провода в пролете, предельных нагрузок на материалы	Тип провода: простой или транспонированный	
	Провода: сечение, размеры, упрочнение, клейка	
	Опоры, пролеты	
	Расчетная схема концентроров	

3.4 Оптимизация по стойкости к тангенциальным силам

В таблице 17 приведены основные зависимости между электродинамической стойкостью и параметрами оптимизации тангенциальных сил.

Таблица 17-Основные зависимости между электродинамической стойкостью и параметрами оптимизации тангенциальных сил

Желаемый эффект	Параметры оптимизации	Объект оптимизации
Предотвращение поворота и вращения обмоток, отводов и переходов.	Оптимальное расположение емкостных колец, регулировочных зон, разгонов	Тангенциальные деформации и тангенциальная прочность
Предотвращение смещения прокладок.	Симметрирование обмоток	
	Учет динамики	
	Уменьшение радиального поля	

При оптимизации электродинамической стойкости и параметров оптимизации тангенциальных сил рекомендуется выполнять следующие мероприятия:

- применение малоусадочных изоляционных материалов;
- осевая подпрессовка обмоток при их намотке;
- прессовка столбов прокладок перед намоткой обмоток, контроль размеров и числа прокладок в каждом столбе прокладок;
- сушка обмоток под давлением;
- повышенный контроль осевых размеров обмоток на всех технологических операциях.

3.5 Рекомендации по повышению электродинамической стойкости трансформатора ТДН10000/220

С учетом данных рекомендаций был выполнен расчет электродинамической стойкости трансформатора ТДН10000/220 в программе ELDINST.

Были использованы следующие расчетные (оптимизированные) параметры (см. таблицу 18)

Таблица 18- Оптимизированные параметры для расчета трансформатора

Параметр	Величина
1	2
Основные данные	
Мощность, кВА	10000
Число фаз	3
Частота, Гц	50
Схема соединений обмоток	Yп/D-11
Напряжение, В	ВН 230000±12х1,0%; НН 6300
Мощность обмоток, кВА	10000
Испытание главной изоляции	Линия-325, нейтраль-85, 35 кВ
Магнитопровод	
Общие сведения	Трехстержневой, 3409-0,3; Кзап=0,979, Step-Lap
Диаметр стержня, мм	450
Высота окна, мм	1295
Сечение стержня, см ²	0,14576
Сечение ярма, см ²	0,14576
Индукция в стержне, Тл	1,65
Индукция в ярме, Тл	1,65
Межосевое расстояние, мм	1155
Масса стали общая, кг	10588

Продолжение таблицы 18

Обмотка ВН	
Тип	Непрерывная; 53,39 Вольт/виток
Ток, А	25,1
Обозначение катушек	А, Б
Число витков в катушке	А: $51 \frac{11}{16}$, Б: $51 \frac{12}{16}$
Число катушек на стержне	А: 72, Б: 24, всего 96 катушек
Общее число витков	2487
Размеры провода, мм	ПБ 1,25x4,75/1,35 ТУ16.К71-108-2007
Число параллельных проводов	2
Поперечное сечение, мм ²	11,44
Плотность тока, А/мм ²	2,5
Направление намотки	левое

Продолжение таблицы 18

1	2
Длина провода, м	6278
Масса голого провода, кг	1785
Масса изолированного провода, кг	1915
Обмотка НН	
Тип	Непрерывная; 53,39 Вольт/виток
Ток, А	305,5/529,1
Обозначение катушек	К, Л

Число витков в катушке	К: $2\frac{14}{16}$, Л: $\frac{15}{16}$
Число катушек на стержне	К: 34, Л: 8, всего 42 катушек
Общее число витков	118
Размеры провода, мм	ПБ 4,5x18/0,45 ТУ16.К71-108-2007
Число параллельных проводов	2
Поперечное сечение, мм ²	160,28
Плотность тока, А/мм ²	3,51
Направление намотки	ф. «А», «С» - левое; ф. «В» - правое

Продолжение таблицы 18

1	2
Длина провода, м	191,5
Масса голого провода, кг	788
Масса изолированного провода, кг	818,5
Обмотка РО	
Тип	Шести ходовая, U-образная, слюевая; 53,39 Вольт/виток
Ток, А	25,1/26,5(макс)
Обозначение катушек	P1, P2
Число витков в катушке	P1 – 12,5; P2 – 12,5
Число катушек на стержне	P1 – 6x2; P2 – 6x2
Общее число витков	300
Размеры провода, мм	ПБ 2,12x4,0/2,96 ТУ16.К71-108-2007
Число параллельных	1

проводов	
Поперечное сечение, мм ²	8,117х1=8,117
Плотность тока, А/мм ²	3,25 (макс)
Направление намотки	Наружный слой - левое; внутренний слой - правое

Продолжение таблицы 18

1	2
Длина провода, м	(41,2+42,8+1)х6х2
Масса голого провода, кг	221
Масса изолированного провода, кг	324

К получаемым характеристикам электродинамической стойкости относятся разнообразные коэффициенты запаса стойкости, жесткости, устойчивости и прочности, развиваемые усилия, возникающие напряжения и изгибающие моменты, причем рассчитываются как номинальные (рабочие, допустимые) значения, так и максимально допустимые, критические значения напряжений и усилий.

В результате расчета были получены следующие характеристики электродинамической стойкости (их числовые значения представлены далее в таблицах):

K1z–коэффициент запаса стойкости витка наружной обмотки к радиальных сил;

K2z- коэффициент запаса жесткости катушки концентратора при действии радиальных сил;

K3z -коэффициент запаса радиальной устойчивости наружной катушки концентратора;

K4z- коэффициент запаса стойкости наружной обмотки к изгибающему воздействию осевых сил;

K5z - коэффициент запаса устойчивости витка обмотки при изгибе проводников радиальными электромагнитными силами;

K6z- коэффициент запаса устойчивости катушки концентратора к полеганию проводников;

K7z - коэффициент запаса устойчивости витков обмотки к приложенным осевым силам;

K8z - коэффициент запаса стойкости катушки обмотки концентратора к кручению;

σ_{mw} - среднее напряжение в проводниках катушки обмотки высокого напряжения, МПа;

σ_m - среднее напряжение в проводниках катушки концентратора обмотки высокого напряжения, МПа;

σ_{cr1} —максимально допустимое напряжение в витках обмотки высокого напряжения в начальной стадии потери устойчивости, МПа;

σ_{cr2} - максимально допустимое напряжение в витках обмотки высокого напряжения в конечной стадии потери устойчивости, МПа;

σ_{cr} - максимально допустимое напряжение в витках обмотки высокого напряжения в начальной стадии потери устойчивости с учетом осевых усилий сжатия, МПа;

P_b - нижнее граничное допустимое осевое усилие сжатия катушки концентратора, кН;

P_r -максимальное усилие, которое необходимо приложить по вертикальной оси для сопротивления радиальному воздействию сил, кН;

P_t -необходимое для предотвращения кручения обмотки (концентратора) усилие осевого сжатия катушки концентратора, кН;

M_{1max} —изгибающий момент, получаемый от воздействия электромагнитных сил в осевом направлении, возникающий в витках обмоток, Н*м;

M_{2max} - изгибающий момент, получаемый от воздействия электромагнитных сил в радиальном направлении, возникающий в витках обмоток, Н*м;

M_{1lim} -изгибающий момент, получаемый от воздействия электромагнитных сил в осевом направлении, возникающий в витках обмоток, превышение которого вызывает деформацию обмоток, Н*м;

M_{2lim} - изгибающий момент, получаемый от воздействия электромагнитных сил в радиальном направлении, возникающий в витках обмоток, превышение которого вызывает деформацию обмоток, Н*м;

P_{cr} - критическая сила полегания проводников катушки концентратора, кН;

N_{max} - максимальное осевое усилие в катушке концентратора, кН;

sg_{10} - напряжение формируемое в витках обмотки в направлении к смежным катушкам и радиальным каналам при осевом сжатии, МПа;

sg_{20} - максимальное напряжение сжатия в элементах, расположенных вдоль катушки концентратора, МПа;

P_{rmin} -минимально допустимая сила осевой прессовки катушки концентратора, необходимая для обеспечения радиальной устойчивости [минимальная (наименьшая) сила осевой прессовки, при которой в любой момент короткого замыкания осевое усилие сжатия катушки концентратора не меньше действующей в данный момент силы сжатия по критерию радиальной устойчивости, кН.

Результаты расчета представлены в виде таблиц 19, 20, 21, 22, 23.

Таблица 19- Технологическая обработка обмоток

Обмотка	Прокладки по-	Сила прессовки, кН (МПа)				Ограничения по	Секунда жест-	N_{max} , кН
		1-ая обр	2-ая об-	3-ая об-	Окончат. сила			

	щадь, мм ²	б.	раб.	раб.	прессовки	поле- ганию прово- дов	кость кон- цент- ров, Н/мм	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
НН	18000	144,0 кН (8,0 МПа)	-	-	50,0 кН (2,78 МПа)	716	22,2* 10 ³	139
ВН	42720	256,0 кН (6,0 МПа)	-	-	85,4 кН (2,0 МПа)	1216	28,4* 10 ³	142
РО	70526	141,0 кН (2,0 МПа)	-	-	52,0 кН (0,74 МПа)	153	7,6* 10 ³	79

Таблица 20- Токи обмоток в расчетных режимах

Режим / обмотка	НН	ВН	РО
1	2	3	4
Min, А	2798	-251	251
Nom, А	2806	-221	0
Max, А	2662	-188	-188

Результаты расчета сил прессовки по обмоткам представлены в таблицах 21, 22, 23. Результат расчета силы прессовки верхнего прессующего кольца на главный стержень показал следующие результаты. Общая сила прессовки составила 189 кН. Разложение силы прессовки по торцам концентров:

- НН (1) – 50 кН;
- ВН (1) – 85 кН;

- РО (1) – 26 кН;

- РО (2) – 27 кН.

Разложение усилия при К.З. по торцам концентроров:

- НН (1) – 55 кН;

- ВН (1) – 91 кН;

- РО (1) – 27 кН;

- РО (2) – 28 кН.

Разложение усилия при К.З. по торцам концентроров для нижнего прессующего кольца:

- НН (1) – 53 кН;

- ВН (1) – 93 кН;

- РО (1) – 27 кН;

- РО (2) – 28 кН.

Таблица 21-Результаты воздействия К.З на обмотку НН

К _i / режим	1	2	3
1	2	3	4
K1	4,70	4,64	5,12
K2	48.0	47.39	52.6
K3	1.25	1.23	1.36
K4	4.3	4.16	4.54
K5	100.0	100.0	100.0
K6	7.25	7.41	7.98
K7	6.68	6.82	7.35
K8	100.0	100.0	100.0

Продолжение таблицы 21

1	2	3	4
Kmin	1.25	1.23	1.36

Sgmw, МПа	-17.03	-17.23	-15.64
Ulpls, мм	-0.031	-0.032	-0.029
Pcr	716	716	716
Nmax, кН	139	136	127
Sg10	11.97	11.72	10.88
Sg20	11.97	11.72	10.88

Таблица 22-Результаты воздействия К.3 на обмотку ВН

K _i / режим	1	2	3
1	2	3	4
K1	3,71	3,53	3,78
K2	27,31	25,76	27,85
K3	100,0	100,0	100,0
K4	1,91	2,52	3,92
K5	100,0	100,0	100,0
K6	11,53	13,14	11,7
K7	12,38	14,05	11,97
K8	100,0	100,0	100,0
Kmin	1,91	2,62	3,78
Sgmw, МПа	21,56	22,68	21,19
Ulpls, мм	0,055	0,058	0,054
Pcr	1216	1216	1216
Nmax, кН	138	121	142
Sg10	6,46	5,69	6,68
Sg20	6,46	5,69	6,68

Таблица 23-Результаты воздействия К.3 на обмотку РО

K _i / режим	1	2	3
------------------------	---	---	---

1	2	3	4
K1	10,36	100,0	135,06
K2	82,33	100,0	999,9
K3	100,0	100,0	2,16
K4	100,0	100,0	100,0
K5	1,31	100,0	2,34
K6	1,91	2,44	2,0
K7	16,94	21,71	17,75
K8	100,0	100,0	100,0
Kmin	1,31	2,44	2,0
Sgmw, МПа	7,72	0,0	0,59
Ulpls, мм	0,018	0,0	0,001
Pcr	153	153	153
Nmax, кН	79	62	75
Sg10	4,72	3,68	4,51
Sg20	4,72	3,68	4,51

3.6 Выводы по главе 3

Проанализировав рекомендации с точки зрения их применения на действующих силовых трансформаторах, выпускаемых заводом Тольяттинский Трансформатор, на котором я работаю, выбрал оптимизированные параметры для расчета электродинамической стойкости трансформатора ТДН10000/220. Расчет выполнил в программе ELDINST

Выводы по результатам расчета: электродинамическая стойкость обмоток НН, ВН, РО обеспечена. Температура обмоток при установившемся токе короткого замыкания:

$$- \Theta_{\text{к.з.ВН}} = 108,0 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$- \Theta_{\text{к.з.НН}} = 127,0 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

- $\Theta_{\text{к.з.РО}} = 113,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полученные значения значительно меньше допустимых $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для меди, по ГОСТ Р 52719-2007.

Заключение

Настоящая магистрантская работа посвящена разработке мероприятий по повышению сопротивляемости обмоток силового трансформатора протекающим токам короткого замыкания.

Выбранная тематика исследования безусловно является актуальной на сегодняшний момент, так как необходимость дальнейшего повышения надежности федеральной энергетической системы является одной из приоритетных задач развития промышленного сектора Российской Федерации. Я предлагаю это сделать за счет повышения надежности её основного структурного компонента – силового масляного трансформатора.

Обеспечение стойкости силового трансформатора каварийным и близким к аварийным режимам, всегда была сложной научно-технической проблемой, которую исследовали с момента появления первых трансформаторов. В настоящее время данная проблема стала ещё более актуальной, так как значительно сократилось количество трансформаторов, испытываемых на стойкость при коротком замыкании, значительно снизился объем научных исследований в данной области, забывается приобретенный ранее опыт работ в этой области.

Рассмотрены основные тенденции трансформаторостроения с учетом современных экономических условиях и глобализации рынка.

В работе решена главная цель - разработка мероприятий по повышению сопротивляемости обмоток силового трансформатора протекающим токам короткого замыкания.

При достижении данной цели решены следующие задачи:

- всесторонне рассмотрены особенности поведения силового трансформатора при протекании через его обмотки токов короткого замыкания;
- проанализированы статистические данные по повреждениям силовых трансформаторов токами короткого замыкания, определены наиболее часто повреждаемые трансформаторы. Это модели ТДЦ125000/110, средний срок

службы до отказа которого составляет 15,5 лет и трансформатор ТДН10000/220;

- подробно рассмотрен механизм появления повреждений в обмотках под воздействием токов короткого замыкания;

- проведена комплексная оценка параметров электродинамической стойкости обмоток силовых трансформаторов;

- проанализированы критерии оценки электродинамической стойкости и методы расчета в том числе с применением электронно-вычислительной техники;

- схематично рассмотрено воздействие различных электродинамических сил на обмотки трансформаторов, показаны направления воздействия, взаимодействие сил;

- выбраны наиболее перспективные решения, позволяющие повысить электродинамическую стойкость;

- разработаны рекомендации по повышению сопротивляемости обмоток силового трансформатора протекающим токам короткого замыкания.

При оптимизации сил прессовки с учетом динамических воздействий необходимо определять:

- а) динамические воздействия на опорные конструкции, изоляцию и проводники обмотки. В зависимости от их величин подобрать оптимальную силу прессовки;

- б) минимально допустимые значения осевых перемещений торцевых катушек и отводов;

- в) минимальные значения осевых вил, воздействующих на опорные конструкции;

- г) минимальные значения сжимающих осевых динамических сил.

При оптимизации электродинамической стойкости к воздействию тангенциальных сил рекомендуется учитывать следующий рекомендации и параметры:

- применять малоусадочных изоляционных материалов;

- использовать осевую подпрессовку обмоток при их намотке;
- применять прессовку столбов прокладок перед намоткой обмоток, контролировать размеры и число прокладок в каждом столбе прокладок;
- производить сушку обмоток под давлением;
- производить повышенный контроль осевых размеров обмоток на всех технологических операциях производства.

С учетом выбранных рекомендаций был выполнен расчет электродинамической стойкости трансформатора ТДН10000/220 в программе ELDINST.

Расчет показал, что электродинамическая стойкость обмоток НН, ВН, РО обеспечена. Температура обмоток при установившемся токе короткого замыкания:

- $\Theta_{к.з.ВН} = 108,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $\Theta_{к.з.НН} = 127,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $\Theta_{к.з.РО} = 113,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полученные значения значительно меньше допустимых $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для меди, по ГОСТ Р 52719-2007.

Список используемых источников

1. Значение трансформатора в современной энергетике. [Электронный ресурс] / Интернет-проект Энергия будущего. URL: <http://zaryad.com/2011/05/10/znachenie-transformatora-v-sovremennoy-energetike/>
2. В.А. Свиридов. Проблемы электродинамической стойкости силовых трансформаторов и пути их решения. Международный научный журнал «Инновационная наука» №5, 2016 г.
3. Электродинамическая стойкость [Электронный ресурс] / Электронный справочник нормативно-технической документации URL: https://normative_reference_dictionary.academic.ru/90051/%D0
4. Хренников А.Ю. Некоторые вопросы электродинамических испытаний мощных силовых трансформаторов на стойкость токам КЗ [Электронный ресурс] / Информационный портал «TRANSFORMаторы» URL: <http://www.transform.ru/articles/html/04production/a000037.article> Дата обращения 26.01.2018
5. О создании Федерального испытательного центра «Электродинамические испытания силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ» Ю. Дементьев, В. Смекалов, Ю. Шакарян, А. Хренников. / Информационно-справочное издание (электронный журнал) «Новости электротехники» №4 (106) 2017 URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2014/85/06.php> Дата обращения 24.01.2018 г.
6. Силовые машины—Toshiba. Высоковольтные трансформаторы. [Электронный ресурс] / Информационный портал «WikiProm» URL: <http://www.wiki-prom.ru/3988zavod.html> Дата обращения 28.01.2018
7. Электромашиностроительный завод [Электронный ресурс] / Информационный портал «WikiProm» URL: <http://www.wiki-prom.ru/3095zavod.html> Дата обращения 28.01.2018

8. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз ; Томский политехнический университет. - 6-е изд., испр. - Томск : ТПУ, 2013. - 181 с.
9. Встовский А.Л. Электрические машины [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Л. Встовский. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. - 464 с. : ил.
10. Коробов Г.В. Электроснабжение : курсовое проектирование : учеб. пособие для вузов / Г. В. Коробов, В. В. Картавцев, Н. А. Черемисинова ; под общ. ред. Г. В. Коробова. - Изд. 3-е, испр. и доп. ; гриф УМО. - Санкт-Петербург : Лань, 2014. - 191 с. : ил.
11. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению подготовки 140400 "Электроэнергетика и электротехника" / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. - 4-е изд., стер. - Москва : КНОРУС, 2014. - 648 с. : ил.
12. Анализ повреждений силовых трансформаторов [Электронный ресурс] / Информационный портал «TRANSFORMаторы» URL: [http://www.transform.ru/sst/\\$rd/analiz_povrejdeniy.htm](http://www.transform.ru/sst/$rd/analiz_povrejdeniy.htm) Дата обращения 28.01.2018
13. Электрические машины [Электронный ресурс] : Машины постоянного тока. Трансформаторы : практикум по дисциплинам "Электр. машины" и "Электромеханика" / Ю. П. Петунин [и др.] ; ТГУ ; Ин-т энергетики и электротехники ; каф. "Электроснабжение и электротехника". - Тольятти : ТГУ, 2015. - 75 с. : ил.
14. Губарев В.А., Густилин А.А. Использование переключения с треугольника в звезду для регулирования напряжения в преобразовательных трансформаторах. Сборник научных статей «Тенденции и перспективы развития науки XXI века». Выпуск 33. В 2 ч. Ч.2/ - Уфа: Аэтерна, 2017.- с. 48-50
15. Хорольский В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения : учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению 140400 "Электроэнергетика и электротехника" / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. - Москва : Форум, 2016. - 287 с. : ил.

16. Вахнина В.В. Проектирование систем электроснабжения [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. пособие / В. В. Вахнина, А. Н. Черненко ; ТГУ ; Ин-т энергетики и электротехники ; каф. "Электроснабжение и электротехника". - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2016. - 78 с. : ил.

17. Шаповалов В.А. Организация эксплуатации и ремонта электрооборудования [Электронный ресурс] : практикум / В. А. Шаповалов ; ТГУ ; Ин-т энергетики и электротехники ; каф. "Электроснабжение и электротехника". - Тольятти : ТГУ, 2016. - 32 с. : ил.

18. Зиновьев Г.С. Силовая электроника : учеб. пособие для акад. бакалавриата. В 2 ч. Ч. 1 / Г. С. Зиновьев ; НГТУ. - 5-е изд., испр. и доп. ; Гриф УМО. - Москва : Юрайт, 2016. - 390 с. : ил.

19. Дайнеко В.А. Эксплуатация электрооборудования и устройств автоматики [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. А. Дайнеко, Е. П. Забелло, Е. М. Прищепова. - Минск : Новое знание, 2015 ; Москва : ИНФРА-М, 2015. - 333 с. : ил.

20. Губарев В.А. «Формы и методы привлечения трудовых кадров». Сборник статей международной научно-практической конференции «Наука: прошлое, настоящее, будущее». 15 августа 2015 года: в 2-х ч. Ч. 1./- Уфа: Аэтерна, 2015.- с. 106-108

21. Губарев В.А. «Определение потребности промышленно-производственного персонала». Сборник статей международной научно-практической конференции «Наука: прошлое, настоящее, будущее». 15 августа 2015 года: в 2-х ч. Ч. 1./- Уфа: Аэтерна, 2015.- с. 108-110

22. Быстрицкий Г.Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы : учеб. пособие для акад. бакалавриата / Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин. - 2-е изд., испр. и доп. ; гриф УМО. - Москва : Юрайт, 2016. - 173, [1] с. : ил. - (Университеты России)

23. Грачева Е.И. Некоторые особенности электрических трансформаторов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Е. И. Грачева, О. В. Наумов. - Москва : Русайнс, 2016. - 183 с. : ил.

24. Термическая и динамическая стойкость КТП. [Электронный ресурс] / Информационный портал «Проектант» URL:<https://www.proektant.org/index.php?topic=31214.0> Дата обращения 10.02.2018

25. Борисов Ю.М. Электротехника : учеб. по курсу "Общая электротехника" для студентов неэлектротехн. специальностей / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. - 3-е изд., стер. ; гриф УМО. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2014. - 587 с. : ил.

26. Епифанов А.П. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебник / А. П. Епифанов, Г. А. Епифанов. - Санкт-Петербург : Лань, 2017. - 300 с. : ил.

27. Испытание трансформаторов на стойкость при внезапном коротком замыкании. [Электронный ресурс] / Информационный портал «Электрические сети» URL:<http://leg.co.ua/transformatory/praktika/ispytanie-transformatorov-na-stoykost-pri-vnezapnom-korotkom-zamykanii.html> Дата обращения 11.02.2018

28. PORTALES E., FILION Y., MERCIER A. Transformer-controlled switching taking into account residual flux – Modelling transformers for realistic results in system studies // RECIFE 2013, p. 68.

29. Del Vecchio R.V., Poulin D., Feghali P.T., Shad D.M., Ahuja R. Transformer Design Principles. With Applications to Core-Form Power Transformers. NY USA, Taylor & Francis, 2015.

30. A. Prieto, M. Cuesto, P. Pacheco, M. Oliva, L. Prieto, A. Fernandez/ Optimization of power transformers based on operative service conditions for improved performance 21, rue d'Artois, F-75008 PARIS [electronic resource] / URL: [https://library.e.abb.com/public/258111ab5758557dc1257b16002b71dc/A2_207_Cigre2012_1LAB000509_Optimization of power transformers.pdf](https://library.e.abb.com/public/258111ab5758557dc1257b16002b71dc/A2_207_Cigre2012_1LAB000509_Optimization%20of%20power%20transformers.pdf)

31. A performance-oriented power transformer design methodology using multi-objective evolutionary optimization. Amr A. Adly, Salwa K., Abd-El-Hafiz. Journal of Advanced Research, Volume 6, Issue 3, May 2015, Pages 417-423 [electronic resource] / URL: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2014.08.003>

32. Design optimization of distribution transformers by minimizing the total owning cost. Luigi Pio Di Noia .Davide LauriaFabio MottolaRenato Rizzo[electronic resource] / International transactions on Electrical Energy Systems. First published: 18 August 2017 / URL:<https://doi.org/10.1002/etep.2397>.