

ISSN 1995-5685

ЭЛЕКТРО

4'2009

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА • ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ



ОАО «ВИТ» 50 лет

УКРАИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ, ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИЯ

ОАО «ВИТ» основан в 1959 году

- В 1969 году утвержден научно-техническим центром в области трансформаторостроения
- С 1992 года — головная организация в области трансформаторов и высоковольтных аппаратов, занимающаяся вопросами исследования, разработки и создания новейших образцов электротехнического оборудования
- С 2006 года входит в состав Холдинговой компании «ЭЛЕКТРОЗАВОД»

ОАО «ВИТ» проводит научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по следующей номенклатуре электротехнического и технологического оборудования

- силовые трансформаторы и автотрансформаторы всех габаритов на напряжения включая 1150 кВ переменного тока масляные, сухие, с газовым наполнением общего и специального назначения;
- трансформаторы для ЛЭП постоянного тока и вставок постоянного тока напряжением до ± 750 кВ;
- электрические реакторы различного назначения, в том числе шунтирующие реакторы на напряжение до 750 кВ;
- трансформаторы электропечные, преобразовательные, тяговые;
- создание методов для расчета и анализа конструкций трансформаторов и реакторов;
- переключающие устройства для регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой на напряжение до 330 кВ и токи до 3000 А включительно;
- переключающие устройства для регулирования напряжения трансформаторов без возбуждения;
- измерительные трансформаторы масляные, с газовым наполнением всех классов напряжения, включая 1150 кВ;
- специальное технологическое оборудование для производства, а также для ремонта и монтажа трансформаторов, реакторов и аппаратов высокого напряжения;
- высоковольтные вводы до 330 кВ для силовых трансформаторов;
- устройства для испытаний силовых и измерительных трансформаторов в эксплуатации;
- высоковольтная аппаратура;
- испытательное оборудование;
- анализ опыта изготовления и эксплуатации



ОАО «ВИТ» располагает

лабораторно-экспериментальным комплексом, включающим цех экспериментального производства; большим (144x60x60м) и малым высоковольтными залами; стендами для электромагнитных, тепловых, климатических, механических и других видов испытаний трансформаторов и аппаратов, отдельных узлов конструкций, электротехнических и конструкционных материалов



Институт является коллективным членом СИГРЭ и осуществляет представительство Украины в технических органах МЭК, сотрудничает с ведущими академическими и научно-исследовательскими институтами энергетики и высоковольтной техники Украины, России и других стран СНГ

ЭЛЕКТРО

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА • ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ



СОДЕРЖАНИЕ

ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 2000 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ

ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алпатов М.Е. - д.т.н., ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД»
Бутырин П.А. - член-корреспондент РАН
Быков В.А. - к.т.н., ВИНТИ РАН
Васильев В.А. - ОАО «ФСК ЕЭС»
Добрусин Л.А. - д.т.н., ГУП «ВЭИ им. В.И. Ленина»
Ковалев В.Д. - д.т.н., проф.,
ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД»
Кудрявый В.В. - д.т.н., проф., Главный редактор
Кучеров Ю.Н. - д.т.н., ОАО «СО ЕЭС»
Макаревич Л.В. - Генеральный директор
ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД»
Месенжник Я.З. - д.т.н., проф., ВНИИ КП
Старшинов В.А. - к.т.н., проф., МЭИ
Фаворский О.Н. - академик РАН
Шакарян Ю.Г. - д.т.н., проф., ОАО «ВНИИЭ»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Кудрявый В.В.

РЕДАКЦИЯ

Быков В.А. – зам. главного редактора
Гинзбург Т.В. – отв. секретарь
Соболевская Е.Г., Фонарева М.В.

Адрес редакции:

Россия, 107023 Москва,
Электрозаводская ул., 21
журнал ЭЛЕКТРО

Тел.: (499) 152-5655, (495) 777-8201

Факс: (495) 777-8211

E-mail: elektro@viniti.ru
elektro1@viniti.ru

tech@elektrozavod.ru

<http://elektro.elektrozavod.ru>

Журнал зарегистрирован
Министерством Российской Федерации по делам
печати, телерадиовещания и средств массовых
коммуникаций ПИ 77-3052 от 24 марта 2000 г.
Регистрационный номер 004102
© «Электрозавод» 2000 г.

Тираж 1500 экз.

4'2009

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

50 лет Украинскому научно-исследовательскому, проектно-конструкторскому и технологическому институту трансформаторостроения ОАО «ВИТ»

Мелешко И.Ю. 2

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

Определение коэффициента трансформации и группы соединения обмоток трехфазного трансформатора с использованием рассчитанных или измеренных коэффициентов трансформации при однофазном питании

Зайцев В.А. 12

Методология выбора изоляции трансформаторного оборудования УВН переменного тока

Чорноготский В.М., Джунь Л.П. 19

Программное обеспечение проектирования трансформаторов и реакторов

Паук Ю.И., Дорогокупля В.А., Желонин В.А., Кравченко С.В., Лазарев В.И., Остренко М.В., Тарчуткин А.Л., Чорноготский В.М. 26

Исследование изоляции холостых витков в обмотках силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов

Чорноготский В.М., Джунь Л.П., Шлыков А.Г. 37

ОБОРУДОВАНИЕ

Серии трансформаторов 110 кВ с РПН. Этапы развития

Смагин А.П. 40

Разработки ОАО «ВИТ» в области измерительных трансформаторов высокой точности

Килевой В.К. 44

ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Об определении срока службы целлюлозной изоляции силовых трансформаторов

Кулик Л.А., Манвелидзе С.Г., Краснобаева Н.В., Грановская В.Н. 49

ИНФОРМАЦИЯ 36, 52

Перепечатка материалов из журнала допускается только с разрешения редакции. За точность фактов и достоверность информации ответственность несут авторы. Мнение редакции не обязательно совпадает с точкой зрения авторов. За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

50 ЛЕТ УКРАИНСКОМУ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ, ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОМУ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИЯ

ОАО «ВИТ»

Мелешко И.Ю.

Бурное развитие энергетики Советского Союза, начавшееся в пятидесятые годы прошлого столетия, предопределило создание института трансформаторостроения. Оно привело к необходимости создания трансформаторного оборудования повышенной надежности на новые ультравысокие классы напряжения — 750 и 1150 кВ переменного тока и ± 400 и ± 800 кВ для ЛЭП постоянного тока.

1. На основании Постановления Совета Министров СССР от **17 августа 1959 г.** № 962 «О мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности» создан **Запорожский научно-исследовательский институт трансформаторостроения и высоковольтной аппаратуры (ЗНИИТВА)** на базе Запорожского трансформаторного завода. На начальном этапе с ЗТЗ было переведено 235 конструкторов, исследователей и других работников.

1.1. В 1969 г. приказом МЭТП СССР от 04.06.1969 г. № 221 ЗНИИТВА преобразован в отраслевой научно-технический центр по трансформаторостроению — **научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт трансформаторостроения (Всесоюзный институт трансформаторостроения — ВИТ)**. По решению МЭТП СССР ВИТ в 1971 г. включен в состав объединения «Запорожтрансформатор», а в 1979 г. выведен из его состава и вновь наделен правами научно-технического центра по трансформаторостроению вплоть до 1992 г.

Период с 1960 г. по 1992 г. — это этап создания и функционирования единой системы «отраслевая наука – производство», базирующейся, прежде всего, на производственной базе ЗТЗ и научной базе ВИТ.

Именно в этот период был выполнен основной объем научно-исследовательских (НИР), опытно-конструкторских (ОКР) и технологических работ (ОТР), позволивших создать трансформаторное оборудование предельных классов напряжений и мощности (рис. 1 и 2) повышенной надежности и существенно поднять технический уровень всего трансформаторостроения.

Основные результаты этих работ.

- Проведены широкомасштабные высоковольтные, электромагнитные, тепловые и механические исследования на малых и крупномасштабных моделях трансформаторов и на их основе разработан комплекс отраслевых нормативных документов по расчетам и проектированию трансформаторов. Ежегодный анализ



Рис. 1. Динамика роста единичной мощности трансформаторов

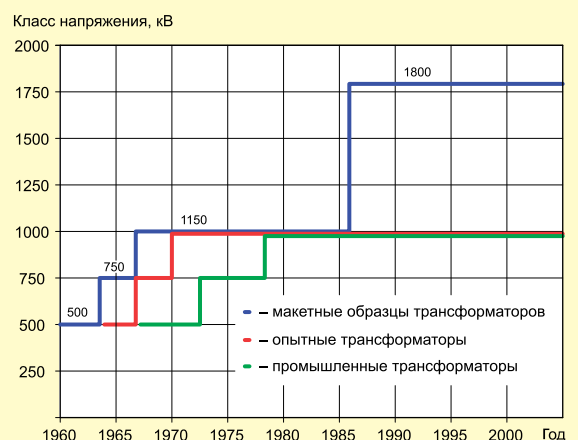


Рис. 2. Динамика роста предельных классов напряжений трансформаторов

опыта эксплуатации и выхода из строя трансформаторов мощностью 80 МВА и более на напряжения 110-750 кВ. Результаты проведения в ряде случаев специальных исследований для определения причин выхода трансформаторов из строя также были использованы при разработке отраслевых нормативных документов.

- Создан комплекс специального технологического оборудования (по резке электротехнической стали, сборке магнитопроводов, изготовлению обмоток, изоляции и изоляционных деталей сложной конфигурации, термовакуумной обработке и т.д.) и разработаны типовые технологические процессы всех основных операций по изготовлению трансформаторов.

- Отработана методология создания трансформаторного оборудования новых типов и на сверх- и ультравысокие классы напряжения. По разработкам института ПО «Запорожтрансформатор» изготовил около 400 трансформаторов 750 кВ, 18 трансформаторов 1150 кВ и 14 — 320 МВА \pm 750 кВ. Разработанный и изготовленный институтом макетный образец АТ 1800/500 кВ успешно выдержал испытания $U_{\text{длит.}} = 1425$ кВ; $U_{\text{ки}} = 2600$ кВ; $U_{\text{пги}}$ и $U_{\text{сги}} = 3200$ кВ (рис. 3).



Рис. 3. Полномасштабная модель автотрансформатора класса напряжения 1800 кВ

Длительное напряжение 1425 кВ
Коммутационный импульс 2600 кВ
Полный грозовой импульс 3200 кВ
Срезанный грозовой импульс 3200 кВ

- Разработаны ВИТ и освоены предприятиями подотрасли трансформаторостроения несколько поколений серии трансформаторов 35 кВ и 110 кВ; серии трансформаторов на напряжение 220, 330 и 500 кВ, в т.ч. предельной мощности.

- Разработаны и утверждены государственные стандарты на силовые трансформаторы всех классов напряжения до 750 кВ включительно.

- Созданы и включены в государственную поверочную схему эталоны метрологического оборудования на все классы напряжения до 500 кВ переменного тока и до 800 кВ постоянного напряжения.

Кроме того, выполнен большой объем исследований, связанных с разработкой переключающих устройств, включая многолетние исследования нагрузочной способности контактных систем РПН. Проведены исследования по применению тиристорных устройств РПН для бездуговой коммутации тока (первое тиристорное устройство изготовлено институтом и с 1973 г. по настоящее время находится в эксплуатации). На этой основе разработана серия устройств РПН типа РНТА на токи от 630 до 2000 А, высокоэффективные и надежные устройства РПН типа переключателей нагрузки на 125 и 200 А. Производство устройств освоено на ZTR.

Проведены исследования и разработано бесконтактное (без подвижных частей) тиристорное устройство типа РНТА-10/63П для распределительных трансформаторов, изготовлен и испытан опытный образец. При его создании решены задачи, связанные с устойчивостью устройства к токам к.з. и перенапряжениям, с управлением в аварийных случаях.

По измерительным трансформаторам разработаны и изготовлены:

- опытные образцы новой серии малогабаритных измерительных трансформаторов тока (ТОМ) на напряжение 35-500 кВ, а также комплекс технологического оборудования для их изготовления;

- опытные образцы трансформаторов напряжения с элегазовой изоляцией (SF₆) на напряжения 110-500 кВ (серия ЗНОГ), а также напряжением 1150 кВ типа НДЕГ.

1.2. В 1992 г. ВИТ определен головной организацией Министерства промышленной политики Украины по трансформаторам и высоковольтной аппаратуре и переименован в «Украинский институт трансформаторостроения» — ВИТ. В 1995 г. решением Запорожского областного совета народных депутатов институт преобразован в открытое акционерное общество (ОАО «ВИТ»), при этом 52% акций выкупили сотрудники института.

В период с 1992 по 1995 гг. за счет бюджетного финансирования и финансирования из инновационных программ энергетики институтом были решены задачи разработки и освоения на предприятиях Украины номенклатуры трансформаторно-реакторного оборудования, ранее не выпускавшегося на Украине (специальные трансформаторы и реакторы, шунтирующие реакторы (ШР) на напряжение 750 кВ и др.). Организован ремонт и модернизация в/в вводов на напряжение 110-330 кВ с полной перемоткой остовов вводов и на напряжение 500-750 кВ — частичный ремонт; ремонт и модернизация печных трансформаторов 40 МВА, 154 кВ, включая узел РПН, для ферросплавных заводов Украины. Только за счет установки тиристорных

блоков в устройствах РНО-20 ресурс устройств повышен в десятки раз.

1.3. В 1996 г. практически полностью было прекращено бюджетное финансирование и финансирование из инновационных программ энергетики, наступил этап работы института в реальных рыночных условиях. Анализируя работы, выполненные институтом за последующие 10 лет (1996-2005 гг.), следует отметить следующее.

- Создана комплексная модель и испытательный стенд (рис. 4) для исследований электрической прочности изоляции силовых трансформаторов с заполнением элегазом (SF_6) при всех эксплуатационных воздействиях. Установка позволяет проводить высоковольтные и тепловые исследования моделей, теплообменников типа SF_6 /вода, газодувок при давлении SF_6 от 1,1 до 4 атм. (абс. при 20 °С) напряжением 6-400 кВ. Максимально возможный расход SF_6 в установке — 30 м³/мин.



Рис. 4. Установка для высоковольтных и тепловых исследований конструкций в среде SF_6

- Проведены электромагнитные исследования на среднемасштабных моделях однофазных и трехфазных трансформаторов предельной мощности, ШР 110 МВАр, 750 кВ. Все эти исследования использованы для дальнейшего совершенствования методов расчета и создания программно-методического обеспечения. Отдельные программы по расчетам и комплекс расчетной подсистемы САПР трансформаторно-реакторного оборудования стал востребованным продуктом на мировом рынке.

- Приобретен опыт заключения лицензионных соглашений и продажи лицензий. Так, фирмой Хюндай по лицензионным соглашениям с ВИТ (заключены в 1997 г. на 10 лет; в 2008 г. лицензионное соглашение по трансформаторам 750 кВ продлено еще на 5 лет) изготовлено более 50 трансформаторов и АТ на напряжение 750 кВ и 12 силовых трансформаторов 20 МВА, 154 кВ с элегазовым заполнением (рис. 5 и 6). Всего продано 8 лицензий.

- Осуществлена комплексная поставка КД и ТД, технологического оборудования (под ключ) на ОАО «ОРЭМИ», г. Бишкек (Киргизстан) для производства

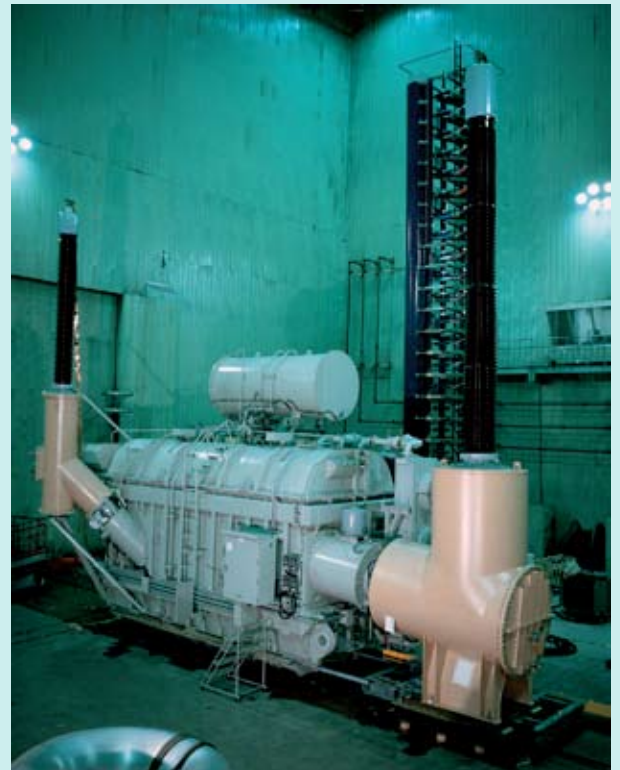


Рис. 5. Однофазный трехобмоточный автотрансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой 333,35 МВА, сочетание напряжений 765/345 кВ



Рис. 6. Однофазный трехобмоточный трансформатор с изоляцией «NOMEX-SF₆» мощностью 20 МВА с РПН для электрических сетей 154 кВ

распределительных трансформаторов и КТП наружной установки мощностью до 630 кВА напряжением 6-10/0,4 кВ, в том числе горизонтально-намоточные станки, стенды для сборки магнитопроводов, вакуум-заливочный комплекс с установкой сушки токами пониженной частоты, комплекс нанесения порошковых полимерных красок, автоматизированная испытательная станция и др.

- Разработаны и пользуются спросом новые серии вакуум-дегазационных установок производительностью 1,3 и 10 м³/час (с 2002 г. поставлено 8 установок на предприятия стран СНГ); горизонтально-намоточных станков с 2002 г. предприятиям стран СНГ поставлено 46 шт., в т.ч. Минскому электротехническому заводу — 30 шт.

- Разработаны и освоены экспериментальным производством новые серии печных, преобразовательных и тяговых трансформаторов, реакторов различного назначения и др. На рис. 7 показан преобразовательный трансформатор 10 МВА, разработанный и изготовленный ВИТ для Запорожского алюминиевого комбината в 1997 г.

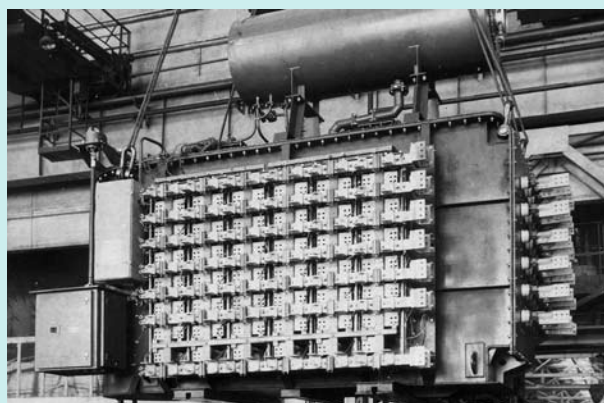


Рис. 7. Трансформатор трехфазный преобразовательный 10000 кВА, 10 кВ

- Разработано и освоено производство многопредельных трансформаторов тока (9 типов) и напряжения (11 типов) высокой точности для применения в схемах измерения потерь мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов.

- Разработано и освоено производство испытательных трансформаторов (12 типов) и испытательных установок (8 типов) с выходными напряжениями от 12 до 500 кВ для проведения испытаний различного высоковольтного электрооборудования частотой 50 Гц. Шеньянскому заводу измерительных трансформаторов (Китай) изготовлена и поставлена испытательная установка на 1150 кВ (рис. 8).

1.4. В 2000 г. государством было принято решение о продаже на конкурсной основе 25%-ного государственного пакета акций ОАО «ВИТ». Для возможности участия в конкурсе было создано закрытое акционерное общество «Трудовой коллектив ВИТ» (ЗАО «ТК ВИТ»). В состав учредителей ЗАО вошли работники института, члены их семей и бывшие работники



Рис. 8. Испытательная установка ВГИ на класс напряжения 1150 кВ

института (пенсионеры), всего около 1200 чел., которые внесли в фонд ЗАО 52 % акций ОАО «ВИТ».

В 2001 г. ЗАО «ТК ВИТ» выиграл конкурс и стал обладателем еще 25 % акций ОАО «ВИТ», приняв при этом ряд обязательств на последующие пять лет, которые успешно выполнил.

В 2001 и 2005 гг. институт подвергся попыткам недружественного захвата со стороны ряда фирм. В 2005 г. руководство ОАО «ВИТ» и ЗАО «ТК ВИТ» провели переговоры с генеральным директором ХК «Электрозавод» Л.В. Макаревичем, подписали соглашение и продали контрольный пакет акций ХК «Электрозавод». И хотя судебные тяжбы и недобросовестная конкуренция все еще имеют место, институт продолжает работать, расширяя свою внешнеэкономическую деятельность.

Наступил новый этап в истории института.

Поэтапно разрабатывается концепция и осуществляется модернизация и реконструкция экспериментального производства и исследовательско-испытательной базы института.

Для отработки стратегии дальнейшего развития института проведен анализ тенденций в развитии мировой энергетики и трансформаторостроения, изучен опыт развития испытательных лабораторий Европы за последнее десятилетие и сделана оценка испытательных возможностей ведущих лабораторий мира,

изучается потребность в проведении исследований и испытаний электрооборудования УВН, в сертификации высоковольтного электрооборудования.

Представляется целесообразным остановиться на некоторых аспектах и результатах этой работы с учетом изложенного выше опыта работы института.

2. Тенденции развития трансформаторостроения и основные задачи ВИТ

Либерализация рынка электроэнергии во многих странах мира за последнее десятилетие привела к изменениям в тактике и стратегии развития энергетики и, соответственно, трансформаторостроения. Мировой экономический кризис безусловно также повлияет на эти процессы.

В странах с развитой экономикой и энергетикой такая ситуация привела: к сокращению ввода нового оборудования, затрат на строительство новых электростанций и на развитие электрических сетей; существенному повышению токовой загрузки электрооборудования; разработке мероприятий по продлению срока службы действующего электрооборудования, выработавшего нормативный срок службы; совершенствованию методов и средств диагностики.

В странах с бурно развивающейся экономикой и энергетикой (Южная Корея, Китай, Индия и др.), особенно там, где промышленные центры и энергоресурсы географически удалены друг от друга, идет процесс активного строительства новых электростанций и электрических сетей, в т.ч. на напряжения 750 и 1000-1200 кВ переменного тока и $\pm 400 - \pm 800$ кВ для ЛЭП постоянного тока.

Прогресс в развитии силовой электроники дал новый толчок к разработке и применению в энергетике новых технологий и электрооборудования для регулирования потоков активной мощности, регулирования напряжения в узлах энергосистем (фазоворотные трансформаторные агрегаты, управляемые шунтирующие реакторы, вставки и передачи постоянного тока, различные системы на основе вращающихся машин и статических компенсаторов — FACTS устройства и др.).

Исходя из требований обеспечения энергетической безопасности во многих странах оказывается государственная поддержка созданию и реконструкции отечественных заводов для производства трансформаторного оборудования высших классов напряжения. Другой формой поддержки на государственном уровне являются либо меры по защите внутреннего рынка от экспансии иностранных поставщиков, либо предоставляется часть внутреннего рынка взамен на знания и опыт, передаваемые местным компаниям.

В условиях более жесткой, чем в недалеком прошлом конкуренции, трансформаторные компании проводят обновление традиционной продукции, применяя новые материалы, комплектующие изделия и технологии, повышая удельные нагрузки (высоковольтные,

электромагнитные, тепловые). Идет соревнование уровней технологий и организации производства, проводится коренная реконструкция созданных в 50-60-е годы прошлого столетия производств, ведется обширное строительство новых заводов.

Надежность оборудования — определяющее требование со стороны энергосистем на современном этапе. При этом считается, что соотношение затрат на устранение дефекта трансформатора в период конструирования, во время изготовления, после испытаний и во время эксплуатации составляет примерно 1:10:100:1000.

Исходя из этого, все более востребованными на рынке являются услуги по выполнению «design review» по заказу энергетических компаний.

2.1. Моделирование и расчеты при проектировании — один из основных этапов обеспечения надежности электрооборудования

Соотношение компьютерного и физического моделирования на современном этапе развития трансформаторостроения по-прежнему актуально. При этом речь идет в большей степени об определении тех узких мест, где еще есть необходимость в физическом моделировании. Что касается компьютерного моделирования, то за последнее десятилетие создан широкий спектр коммерческих типовых программ общепромышленного применения; институтами, лабораториями и предприятиями-изготовителями разработаны программы или добавочные компоненты к коммерческим программам.

Созданная в рамках СИГРЕ рабочая группа (РГ) А3.20 призвана оценить существующие технологии моделирования для определения диапазона их применения в качестве метода контроля для лучшего понимания состояния высоковольтного оборудования, экстраполяции результатов испытаний или для замены некоторых испытаний.

В итоге, по нашему мнению, речь идет об определении международно-признанного программно-методического обеспечения (ПМО) и установлении области математического моделирования с использованием этого ПМО для различных видов электрооборудования.

ВИТ сегодня располагает расчетной системой автоматизированного проектирования трансформаторов общего назначения (САПР ТОН), специальными программами для расчета изоляции и электромагнитных расчетов, расчетной системой для шунтирующих реакторов (САПР ШР). Это ПМО разработано на базе классических математических методов общепромышленного применения и результатах исследований огромного количества мало- и крупномасштабных моделей (см. табл. 1).

В табл. 2 приведен выполненный РГ А3.20 (Electra № 234, октябрь 2007) обзор типовых компьютерных программ, используемых при проектировании электрооборудования и ПМО, которое используется и в ВИТ при проектировании трансформаторного оборудования.

Таблица 1

Направление исследований	Тип моделей	Количество испытанных моделей
Электрическая изоляция	Макеты узлов изоляции	550
	Полномасштабные модели	83
	Модели витковой изоляции	2690
Тепловые расчеты	Модели обмоток	более 300
	Опытные образцы и модели охладителей	256
	Образцы вентиляторов обдува	60
	Масляные насосы (опытные образцы)	46
	Модели отводов обмоток	28
Поле рассеяния обмоток и нагрузочные потери	Масштабные физические модели трансформаторов, реакторов и макеты их узлов	105
Электро-динамика	Макеты обмоток (испытания в МДУ) полного диаметра, 1:10 по высоте	204
Оптимизация магнитопровода, потери холостого хода	Масштабные модели магнитопровода и макеты нескольких пакетов	200

Постоянно расширяются география и объем продаж ПМО. Это позволяет апробировать ПМО на различных типах конструкций трансформаторного

оборудования, выпускаемого различными фирмами, определить точность расчетов и необходимость дальнейшего совершенствования.

2.1.1. Электродинамическая стойкость трансформаторов по-прежнему одна из актуальнейших и дискуссионных проблем трансформаторостроения.

До 1990 г. ВЭИ и ВИТ накоплен огромный объем результатов физического моделирования на моделях (РОСТ, ДИНА, ЛДУ и др.) и испытаний реальных конструкций, разработаны методики расчета электродинамической стойкости обмоток трансформаторов.

Ведущими независимыми испытательными центрами и лабораториями предприятий трансформаторостроения в мире также проведено огромное количество испытаний реальных конструкций трансформаторов производства различных фирм.

Применение новых материалов (упрочненные провода с $\delta_{0,2}$ до 2800 кг/см², транспонированные провода со клейкой и др.), технологий стабилизации обмоток позволяют кардинально решать вопросы обеспечения электродинамической стойкости обмоток трансформаторов.

Вместе с тем, понятно, что полностью испытания на стойкость к токам к.з. нельзя исключить, но можно их существенно сократить и в перспективе свести к испытаниям, подтверждающим уровень технологии и производства данного завода-изготовителя,

Таблица 2

Примечания:

Область применения	Программы	Программы производства ОАО «ВИТ»
Выбор варианта, предварительные тендерные расчеты		PRT, SRD
Стандартные расчеты, включая расчеты импедансов, потерь, тепловые расчеты		SAPR TON, TOK, SRD
Анализ процессов в продольной изоляции при испытаниях ПГИ, СГИ, КИ, FW (расчет коэффициентов запаса продольной изоляции)		VLN (COILINS – для расчета коэффициентов запаса)
Анализ магнитного поля, вихревых токов, потерь рассеяния, превышения температур элементов конструкций, в том числе HVDC трансформаторов	ANSYS-EMAG, ANSOFT-MAXWELL, INFOLYTICA-MAGNET, FLUX	MPO, POB in SAPR-TON, EDMAG-3D, HLEAD-2D, TPRANSMAG-2D
Анализ электрического поля (расчет коэффициентов запаса), в том числе HVDC трансформаторов	ANSYS-EMAG, ANSOFT-MAXWELL, INFOLYTICA	EPC in SAPR-TON, ELAX-2D (ENDINS, ENDINS2, MIDINS, BUSHING, NURNINS — для расчетов коэффициентов запаса), DCI
Термический анализ	ANSYS, ANSOFT, INFOLYTICA	TPM, TPL, TPO, TEO, TRM in SAPR-TON
Структурный анализ	ANSYS	Используется ANSYS с набором макрокоманд собственной разработки
Анализ переходных режимов в электрических сетях	EMTP, ATP, NAP2, PSPICE	VLN Также используется NAP2 и версия EMTP-RV

1. Программы общего применения, используемые для расчета электрических, магнитных, тепловых полей, структурного анализа (ANSYS, ANSOFT, INFOLYTICA), как правило, выпускаются независимыми разработчиками, не адаптированы для расчетов трансформаторов или минимально адаптированы под условия расчета трансформаторов и других электротехнических изделий.

2. Специализированные программы для расчета переходных процессов в электрических сетях (EMTP, ATP, NAP2, PSPICE и др.). Эти программы позволяют рассчитать переходные процессы и перенапряжения в сетях, в том числе и на трансформаторах и реакторах, содержат встроенные модели трансформаторов, но степень детализации самих трансформаторов и, соответственно, точность расчетов, часто ограничены предельными возможностями программы. По точности расчетов перенапряжений внутри трансформаторов такие программы уступают узкоспециализированным программам, предназначенным для расчета перенапряжений внутри трансформатора, например, программе VLN.

3. Узкоспециализированные программы разрабатываются, как правило, внутри крупных производителей электрооборудования и трансформаторов по собственным стандартам. Такие программы используются для проведения тендерных расчетов, выбора варианта изделия, предварительных и стандартных расчетов (аналог ОАО «ВИТ» — SAPR TON, PRT).

и испытаниям принципиально новых конструкций и технологий.

Результаты работы рабочей группы СИГРЕ по электродинамической стойкости и новая редакция стандарта МЭК 60076-5, часть 5 «Стойкость при коротком замыкании» (издание 3 2006 г.) открывают путь существенного сокращения испытаний реальных конструкций.

За последние 10 лет ВИТ существенно расширил объем и географию продаж ПО по электродинамической стойкости обмоток — фирмам республики Кореи, Индии, Австралии, Ирана и др. Этими фирмами выполнены расчеты и проведены испытания на стойкость к токам к.з. трансформаторов от 25 МВА до 200 МВА на напряжение до 400 кВ (всего 10 типов) на испытательных стендах КЕМА (Голландия), KERI (республика Корея), Бангалор (Индия) и др.

Работа в этом направлении продолжается, что позволяет отработать методику расчета на различных типах конструкций трансформаторов, выпускаемых различными фирмами.

2.1.2. Электрическая прочность изоляции

Дальнейшее совершенствование ПМО по расчету электрической прочности изоляции связано с внедрением в последнее время быстродействующих вакуумных и элегазовых выключателей, элегазовых подстанций, приведших к возникновению нового рода воздействий — перенапряжений с очень крутыми фронтами и малой длительностью (VFTO); высокочастотным коммутационным перенапряжениям, представляющим опасность не самой величиной перенапряжений, а возможностью резонанса на одной из внутренних резонансных частот объекта. Совершенствование осуществляется на основе доработки программы VLN, в которой расчетным элементом является виток обмотки, разработки программы расчета частотных характеристик трансформаторов в широком диапазоне частот и модуля программы VLN для расчета схемы замещения трансформатора в широком частотном диапазоне. Проводятся также исследования на маломасштабных моделях электрической прочности как межвитковой, так и межкатушечной изоляции при импульсах наносекундного диапазона, при высокочастотных колебательных импульсах с затуханием.

На данном этапе необходима также совместная работа энергетиков и трансформаторостроителей по исследованию этих явлений в эксплуатации.

Потребуется также проведение исследований на малых моделях трансформаторной изоляции при внедрении негорючих изолирующих жидкостей, жидкостей растительного происхождения, высокотемпературных жидкостей и изоляционных материалов и др.

При применении новых конструкций обмоточных проводов (провода с эмалевой изоляцией, с эмалевой изоляцией и оплеткой) потребуется проведение исследований электрической прочности прилегающего к такой обмотке масляного канала и прочности продольной изоляции.

2.1.3. Текущее состояние методик тепловых расчетов

В 60-80 гг. прошлого века в «ВИТ» было проведено большое количество экспериментов по исследованию процессов нагрева обмоток для различных систем охлаждения, включая, направленную циркуляцию масла. К сожалению, уровень развития вычислительной техники и численных методов на тот момент не позволял выполнить обработку результатов так, чтобы получить из опыта критериальные уравнения с целью непосредственного определения коэффициентов теплоотдачи и дальнейшего расчета поля температур обмотки. Поэтому экспериментальные данные были обработаны таким образом, чтобы сразу получать превышения температур катушек или частей катушек, что существенно ограничивает область применения существующих методик, так как отклонения внутреннего строения изоляции реальной катушки от той, что моделировалась в эксперименте, могут быть значительны. Особенно это заметно в расчете температур наиболее нагретых точек обмотки. Для средних температур обмоток это влияние слабо проявляется из-за усреднения температур отдельных катушек и уменьшения соответствующих ошибок. Появление современных средств измерения температуры наиболее нагретых точек обмотки усугубляет эту проблему, так как заказчики трансформаторов требуют жесткого соблюдения норм на данные температуры и могут контролировать их как при испытаниях, так и в эксплуатации.

Как один из шагов решения данной проблемы — это выполнение новой обработки ранее полученных результатов с целью создания новых методик расчета, основанных на современных численных методах. Этот путь требует значительных затрат рабочего времени высококвалифицированных инженеров и научных сотрудников, наличие достаточно мощной вычислительной техники и специального программного обеспечения.

Появление новых материалов, увеличение тепловых нагрузок и новых методов интенсификации теплообмена обмоток (особенно для систем с направленной циркуляцией и систем с многоступенчатым охлаждением) не всегда позволяют воспользоваться старым опытом моделирования и проектирования трансформаторов. В таких случаях без прямого физического моделирования сложно обойтись. Назрела необходимость в создании комплексной модели-прототипа максимально приближенной к реальному трансформатору по размерам, в которой можно создать предельные тепловые нагрузки для многоступенчатых систем охлаждения, включая ONAN, ONAF, OFAF и ODAF виды охлаждения. Необходимо, чтобы в такой модели, кроме косвенных измерений температур, можно было осуществлять и прямые измерения в большом количестве точек, визуально наблюдать за процессами в масле. Такая модель-прототип позволила бы апробировать вновь создаваемые методики расчета и получить новые знания по способам интенсификации теплообмена обмоток.

Все вышесказанное в отношении обмоток можно отнести к исследованию и расчету систем охлаждения. К сожалению, в настоящее время у нас существует определенный недостаток опыта расчета и применения многоступенчатых радиаторных систем охлаждения, особенно в части комбинации ODAF/ONAF; ранее упомянутая комплексная модель-прототип позволила бы восполнить дефицит опыта.

2.1.4. Вибростойкость и сейсмостойкость

При проектировании элементов конструкций и бака трансформаторно-реакторного оборудования используются как расчетные методики, так и прямые физические исследования и испытания комплектующих изделий.

Расчетные методики основаны на использовании программы ANSYS, включая: расчеты на сейсмостойкость активной части; бака со всеми аксессуарами (расширителем, вводами, системой охлаждения); расчеты вибраций активной части и баков шунтирующих реакторов и т.п.

Физические исследования проводятся на вибростенде. Возможности вибростенда позволяют проводить испытания трансформаторов тока до 500 кВ включительно (после переноса на новое место по условиям вертикального габарита до 330 кВ). Краткий перечень оборудования, которое испытывалось и может быть испытано на вибростенде: вводы конденсаторные напряжением 110, 220, 500 кВ; трансформаторы тока серий ТОМ, ТФРМ; шкафы управления; маслоохладители; устройства РПН; трансформаторы напряжения типов НКФ, ЗНОМ; ячейки комплектных распределительных устройств типов: КРУПЭ-6В, КМ-1Ф; реле защиты трансформаторов типа РЗТ.

Актуальной остается проблема повышенных вибраций и высокого уровня звукового давления реакторов, причем, если вибрации на баке достаточно просто снизить, используя более жесткие конструкции баков, то устранить причину вибраций активной части не так просто. Как показывает опыт ОАО «ВИТ», именно повышенный уровень вибрации активной части часто служит причиной выхода из строя реактора, приводит к образованию контуров из-за повреждения изоляции между конструктивными элементами активной части. При этом сама величина вибраций активной части может существенно меняться в процессе эксплуатации, что часто свидетельствует о развивающихся процессах внутри активной части.

2.2. Основные материалы и комплектующие изделия

В обеспечении надежности и технического уровня трансформаторного оборудования основные материалы (обмоточные провода, изоляционные материалы, трансформаторное масло, электротехническая сталь и т.д.) и КИ (вводы ВН, РПН и т.д.) играют огромную роль (в отдельные периоды более половины повреждений было связано с дефектами РПН и вводов ВН). Поэтому понятно стремление ведущих мировых производителей трансформаторов иметь в своем составе компании или владеть акциями компаний, производящих основные материалы и КИ.

Технический прогресс и ужесточение конкуренции на рынке приводит к совершенствованию и созданию нового поколения КИ и основных материалов для трансформаторостроения (высокотемпературные изоляционные материалы и жидкости, элегазовая изоляция, аморфные сплавы и т.д.). Институт обладает огромным опытом, исследовательской базой и методологией проведения исследований для обеспечения высокой надежности трансформаторов и уточнения ПМО при применении новых материалов. Следует отметить, что институт не располагает исследовательской базой для ведения работ по созданию трансформаторного оборудования с использованием высокотемпературных сверхпроводящих материалов.

Представляется логичным в современных кризисных условиях рассмотреть имеющуюся в странах СНГ научную и производственную базу по производству материалов (обмоточные провода, электротехническая сталь, изоляционные материалы, трансформаторные масла и другие охлаждающие жидкости) и КИ (РПН, вводы ВН и др.) и выработать скоординированную политику по развитию этих производств и улучшению их качества и надежности.

Прежде всего речь идет о развитии научного и производственного потенциала РПН-строения. Институт сохранил кадры, исследовательскую базу и обладает огромным опытом и методологией для создания нового поколения переключающих устройств.

Заводом «Изолятор» созданы новые современные мощности по выпуску вводов ВН на все классы напряжения. Мы не сомневаемся в том, что при разработке и внедрении RP технологии проведены всесторонние исследования, а также использованы и результаты исследований в/в вводов с традиционной изоляцией, выполненных ВИТ в 1985-1990 гг. Эти исследования, а также работы по совершенствованию технологического оборудования, технологии изготовления и испытаний в/в вводов были проведены в связи с резким ростом повреждаемости трансформаторов из-за вводов ВН (с 25,6 % в 1985 г. до почти 60 % в 1990 г.).

Вместе с тем, остается одной из общепризнанных проблем существенное отличие условий проведения типовых испытаний вводов ВН на заводе-изготовителе вводов и при их использовании в трансформаторном оборудовании. По нашему мнению, необходимо, особенно для вводов на напряжения 330-1150 кВ и ± 400 - ± 800 кВ, проведение типовых испытаний вводов ВН на моделях установок вводов в трансформаторы. Такая возможность сохраняется в БВЗ института.

3. О создании сертификационного испытательного и исследовательского центра высоковольтного электрооборудования на базе ВИТ

В состав ВИТ входит одна из крупнейших в Европе высоковольтных лабораторий, созданная для проведения исследований и испытаний трансформаторного оборудования для ЛЭП УВН переменного тока на напряжение до 1800 кВ и постоянного тока на напряжение 1250 кВ.

Таблица 3

Испытательные возможности некоторых лабораторий больших мощностей

	ОАО «ВИТ», Украина	KEMA T&D Testing Services HP, Голландия	CESI — Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, Италия	ABB Power Technologies AB, HP Laboratory, Швеция	EDF Les Renardieres Electrical Equipment Lab., Франция	CPRI, India High Power Laboratory, Индия	Korea Electro tech Research Institute, Южная Корея	CERDA, Франция	RENLA, Германия
Максимальная мощность, МВА	–	8400	3000	4000	6600	2500	4800	5000	8400
Максимальный ударный ток*, кА (пиковое значение)	200	–	–	–	–	–	–	280	560
Максимальное напряжение, кВ	–	450	225	250	420	245	288	440	483
Максимальный ток**, кА	100	390	63	100	130	300	110	100	300
Длительность, с	1	0,42	3	1	3	1	1	3	3
Коммутационные испытания:		***	***	***	***	***	***	***	***
Максимальное напряжение, кВ	10	550	315	550	1000	245	550	550	575
Максимальный ток, кА	10	100	63	80	–	63	63	63	–
Количество рабочих	–	50	35	28	40	208	17	17	–

* — испытания на электродинамическую стойкость;

** — испытания на термическую стойкость;

*** — синтетическая схема испытаний

Таблица 4

Испытательные возможности некоторых высоковольтных лабораторий

	ОАО «ВИТ»	Hydro-Quebec Research Institute, IREQ, Канада	KEMA T&D Testing Services, Голландия	CESI, Италия	STRI, Швеция	Centre D'Essais de Bazet HV Laboratory, Франция	EDF Les Renardieres Electrical Equipment Lab., Франция	CPRI, India (JHV) Research Lab., Индия	Korea Electro tech. Research Institute, Южная Корея	CERDA, Франция	RENLA, Германия
Грозовой импульс, кВ	5100	5000	2600	1500	2800	3800	3000	5000	4200	3000	4000
Коммутационный импульс, кВ:											
- в сухом состоянии	4000	2700	2600	1100	1750	2200	2700	5000	2400	1600	2400
- под дождем	2500	1600	-	1100	1750	-	2700	5000	2400	1600	2400
Испытания переменным напряжением, кВ:											
- в сухом состоянии	2000	2100	1000	700	1050	1150	1100	1100	1100	1150	1800
- под дождем	1500	1000	-	700	1050	950	1100	900	1100	1150	1800
Испытания постоянным напряжением, кВ/мА:											
- в сухом состоянии	2500 / 200 мА	1200 / 50 мА	1000	1600 / 15 мА	1250 / 0,3 А	350 / 10 мА	600 / 30 мА	300	400 / 10 мА	1000 / 10 мА	1000
- под дождем	–	1200 / 50 мА	1000	1600 / 15 мА	1250 / 0,3 А	–	600 / 30 мА	150	–	–	–
Измерение уровня частичных разрядов	800 кВ 5 пКл	1200кВ	420 кВ 0,5 пКл	300 кВ	1050кВ	700 кВ	– 2 пКл	1000кВ	1100кВ	750 кВ	800 кВ
Измерение уровня радиопомех	800 кВ	1200кВ	420 кВ	300 кВ	1050 кВ	700 кВ	–	1000кВ	1100кВ	550 кВ	800 кВ
Измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь	600 кВ	1200кВ	420 кВ	500 кВ	1050 кВ	–	600 кВ	500 кВ	800 кВ	350 кВ	800 кВ
Количество рабочих	–	–	23	15	14	8	40	44	10	5	–

В таблицах 3 и 4 приведены испытательные возможности некоторых в/в лабораторий и лабораторий больших мощностей.

ВИТ имеет лучшие технические возможности

среди высоковольтных лабораторий мира (HQRI, Канада; CPRI, Индия и др.) по таким видам испытаний, как грозовой импульс, переменное и постоянное напряжение.

В странах СНГ наиболее мощная лаборатория больших мощностей НИЦ ВВА, Бескудниково, существенно уступает по своим техническим возможностям ведущим лабораториям Европы.

Лаборатории ВИТ имеют также технические возможности и квалифицированный персонал для проведения комплекса испытаний коммутационного и распределительного электрооборудования для сетей на напряжение 6-10 кВ, стенды климатических испытаний и стенды испытаний на вибро- и сейсмостойкость, стенды и камеры для проведения ресурсных испытаний РПН на напряжение до 330 кВ и токи до 3200 А включительно.

В последние годы появилась потребность в проведении в/в испытаний и исследований на предельные для испытательного оборудования уровни испытательных напряжений не только трансформаторного, но и других видов электрооборудования ВН, которые могут быть проведены в ВИТ.

На базе ВИТ создано сертификационное отделение ВИТ-СЕПРО, которое имеет более чем десятилетний опыт сертификации электротехнической продукции на добровольной основе, в т.ч. таких зарубежных фирм, как Schneider Electric, Areva, Siemens, ABB и др.

Испытательный центр института (ВИТ-СЕПРО) аккредитован Национальным агентством по аккредитации Украины, ведется работа по аккредитации его в одном из европейских агентств.

Для аккредитации испытательного центра ВИТ на европейском уровне необходимо обновить парк средств измерений на современные, компьютеризированные, обеспечивающие автоматизацию измерений и обработку результатов.

Одним из важных условий аккредитации на европейском уровне является придание испытательному центру юридической независимости от разработчиков и изготовителей. Наряду с этим необходима скоординированная техническая политика энергокомпаний-потребителей электрооборудования. Эти условия могут быть выполнены, по нашему мнению, в рамках Энергетического Союза СНГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главное в 50-летней истории института сегодня — это неоценимый интеллектуальный потенциал, наработанный за эти годы, и высокий научный и производственный потенциал всех работников института — их знания, опыт, навыки и традиции; это молодое поколение специалистов, для которых работа в институте становится главным делом в их профессиональной жизни. И память о людях, стоявших у истоков создания и становления института, многих из которых сегодня нет в живых. Это руководители и ведущие специалисты министерств, ведомств и организаций электропромышленности и энергетики, Московского электротехнического завода и Запорожского трансформаторного завода, ВЭИ им.В.И. Ленина.

На протяжении длительного времени институт активно сотрудничал и сотрудничает с институтами Академии наук УССР (Институты электродинамики, математики и материаловедения), отраслевыми институтами России и Украины — НИИПТ, ВНИИЭ, ВНИИКП, ВТИ, ВНИИНП, ВНИИБ, Энергосетьпроект, Теплоэлектропроект, Гидропроект.

За прошедшие годы 47 сотрудников института защитили кандидатские диссертации, начальник лаборатории электродинамики Виктор Иванович Лазарев — докторскую диссертацию.

С 1962 г. по 1989 г. институт возглавлял к.т.н. Иван Дементьевич Воеводин, лауреат Ленинской премии, премии Совета Министров СССР и Государственной премии УССР. Ленинская премия присуждена ему, И.С. Калиниченко, В.Ю. Френкелю и С.И. Рабиновичу как ведущим специалистам ЭТЗ и МЭЗ за создание комплекса электрооборудования для ЛЭП 500 кВ.

Государственные премии и премии Совета Министров СССР присуждены: Суханову В.М., Черноготскому В.М., Белецкому З.М., Зуеву И.Я., Сисуненко О.И., Мелешко И.Ю., Басс М.А., Заболотному Н.Л., Медовому И.Л., Лиминой И.К., Смагину А.П., Козлову В.А., Бики М.А., Юшкину В.Н.

Государственные премии и премии Совета Министров УССР также присуждены: Кравченко Л.Г., Носачеву В.А., Сизинцеву М.М., Руденко В.И., Боднар В.В., Афанасьеву М.А., Шифрину Л.Н.

Почетного звания «Заслуженный изобретатель УССР» удостоены: Пшеничный Г.И., Чечелюк Я.З., Афанасьев М.А., Андросов Н.Ф., Винтюк Л.И., Красильников В.Н.

Институт — постоянный член СИГРЭ, МЭК, член ТРАВЭК.

В 1979 г. Указом Президиума Верховного Совета СССР за разработку и освоение трансформаторного оборудования для ЛЭП 750 кВ «Винница-Альбертирша (ВНР)» ВИТ награжден орденом Дружбы народов.

На всех переломных этапах в жизни института находились руководители высших звеньев государственного управления, руководители и ведущие специалисты трансформаторостроения и энергетики, чье понимание, нестандартные подходы и помощь способствовали сохранению и развитию института. Низкий им поклон!

Слова благодарности вузам России и Украины — Ленинградскому политехническому институту, Московскому и Ивановскому энергетическим институтам; Киевскому, Харьковскому, Львовскому и Одесскому политехническим институтам, Запорожскому машиностроительному институту, подготовившим не одно поколение специалистов института.

Мелешко Игорь Юрьевич — председатель правления ОАО «ВИТ», директор Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения, г. Запорожье 810 (38061) 2845215 postmaster@vit.zp.ua

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАССЧИТАННЫХ ИЛИ ИЗМЕРЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ПИТАНИИ

Зайцев В.А.

Предложена обобщенная схема стороны трехфазного трансформатора. Получены простые формулы для расчета линейного коэффициента трансформации и группы соединения обмоток, а также определения этих параметров по результатам расчета или измерений двух-трех однофазных коэффициентов трансформации. Доказана теорема о применимости расчетных формул для трансформаторов с любой схемой и группой соединения обмоток. Разработана методика измерения линейного коэффициента трансформации и группы соединения обмоток с использованием стандартных измерителей этих параметров или метода трех вольтметров.

Ключевые слова: трансформаторы; расчеты; измерения; группы соединений; коэффициенты трансформации; трехфазное питание; однофазное питание; стандартный измеритель; метод трех вольтметров

В преобразовательных трансформаторах все чаще применяются сложные схемы и нестандартные группы соединения обмоток, например, 0,25; 0,5; ... 11,25; 11,5. Расчет линейного коэффициента трансформации (отношения линейных напряжений первичной и вторичной обмоток на холостом ходу) и группы соединения обмоток производятся по векторным диаграммам напряжений с использованием сложных тригонометрических приемов. Для измерения этих параметров при проведении испытаний трансформатора требуются дорогостоящие измерительные приборы. Производители трансформаторов и эксплуатационники зачастую таких приборов не имеют.

В настоящей работе предложен простой метод расчета линейного коэффициента трансформации и группы соединения обмоток с применением новой обобщенной схемы стороны трехфазных трансформаторов и агрегатов с любой схемой и группой соединения обмоток.

Использование обобщенной схемы стороны трехфазного трансформатора дало возможность выявить и доказать в форме теоремы общие для всех трехфазных трансформаторов соотношения между линейным коэффициентом трансформации, группой соединения обмоток и коэффициентами трансформации в режиме однофазного питания. Это позволяет измерять данные параметры с использованием недорогих и широко распространенных однофазных измерителей (и даже с использованием метода трех вольтметров).

Подобный метод применяется при определении группы соединения обмоток [1, 2]. Этот метод предполагает, что коэффициент трансформации уже известен. Для каждой группы соединения используется индивидуальная расчетная формула, но для большинства нестандартных групп соединения такие формулы не проработаны.

Особенности расчета и измерений

Расчет и измерение коэффициентов трансформации и группы соединения обмоток проводятся в режиме холостого хода трансформатора. Токи холостого хода, протекающие по обмоткам, индуцируют основной магнитный поток (этот поток одинаково

сцеплен со всеми обмотками) и магнитный поток рассеяния (этот поток неодинаково сцеплен со всеми обмотками). Это вызывает некоторую потерю напряжения на вторичной обмотке. Емкости между обмотками и магнитной системой несколько увеличивают напряжение на вторичной обмотке. Измеренные и расчетные коэффициенты трансформации могут отличаться на 0,2-0,4%. Для того, чтобы учесть эти отклонения, необходимо измерять ток холостого хода и выполнять сложные расчеты. В настоящей работе незначительная потеря напряжения на вторичной обмотке не учитывается и считается, что напряжения на каждом витке всех обмоток одного стержня равны между собой. Учитывается, что при отсутствии сторон со схемой соединения «треугольник», магнитные потоки в стержнях магнитной системы могут содержать составляющую нулевой последовательности.

В данной работе используется ряд новых терминов:

- фазовый угол двух напряжений ϕ — угол между векторами двух напряжений, отсчитываемый от вектора \vec{U}_{L1} к вектору \vec{U}_{L2} против часовой стрелки;
- векторный коэффициент трансформации \vec{KT} — отношение векторов напряжений;
- коэффициент трансформации КТ — модуль векторного коэффициента трансформации.

Эти величины связаны между собой следующей формулой

$$\vec{KT} = \frac{\vec{U}_{L1}}{\vec{U}_{L2}} = KТ \cdot \exp(-j \cdot \phi) . \quad (1)$$

Обобщенная схема стороны трехфазного трансформатора

Введем понятие обобщенной схемы стороны трехфазного трансформатора, приведенной на рис. 1. На каждом стержне магнитной системы расположено по шесть расчетных обмоток. Обмотки W_{C1}, W_{C2}, W_{C3} , образующие внутри обобщенной схемы замкнутый контур, назовем контурными. Обмотки W_{L1}, W_{L2}, W_{L3} , не входящие в замкнутый контур, назовем лучевыми.

Обмотки реального трансформатора, имеющие две параллельные ветви, в обобщенной схеме заменяются одной обмоткой. Две последовательно соединенные части обмотки одного стержня магнитной системы в обобщенной схеме заменяются одной обмоткой с суммарным числом витков. Автотрансформатор в обобщенной схеме заменяется эквивалентным трансформатором. Такие замены являются расчетным приемом и в режиме холостого хода не приводят к искажению линейных напряжений стороны реального трансформатора. Число витков обмоток обобщенной схемы обозначим также — W_{L1}, \dots, W_{C3} . При отсутствии в реальном трансформаторе обмотки, соответствующей той или иной обмотке обобщенной схемы, числу витков обмотки обобщенной схемы присваивается нулевое значение. Придавая

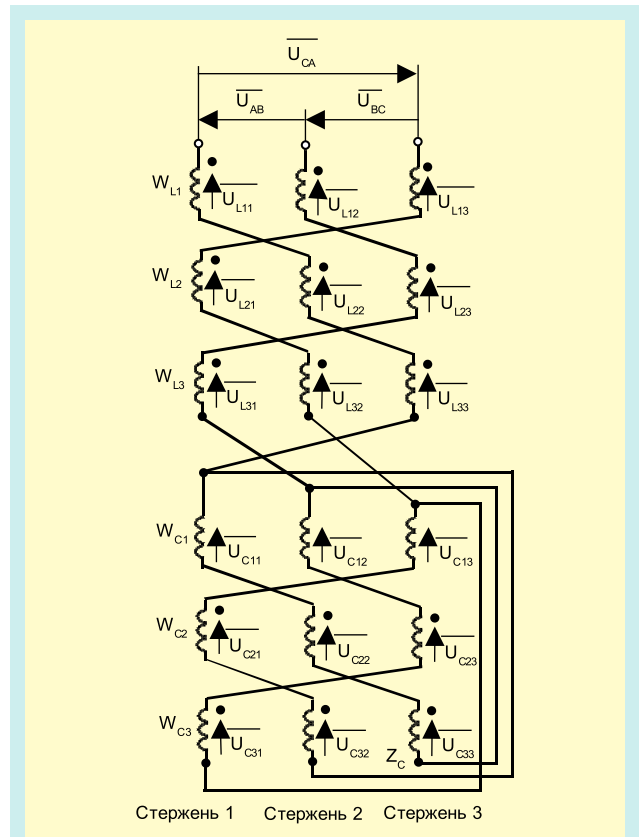
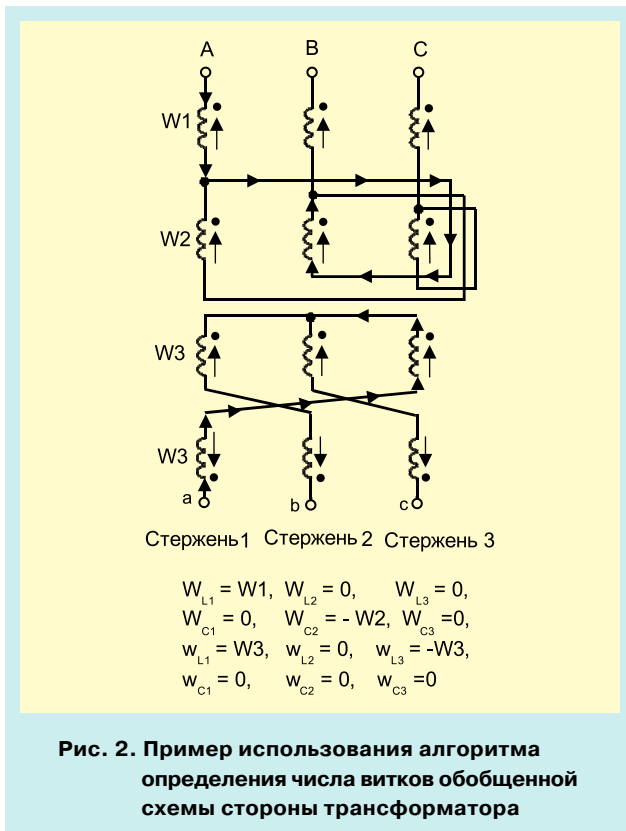


Рис. 1. Обобщенная схема стороны трехфазного трансформатора

числу витков обмоток обобщенной схемы положительные, отрицательные или нулевые значения, можно получить схему стороны любого трансформатора на холостом ходу.

Алгоритм определения числа витков обмоток обобщенной схемы (рис. 2):

- заменить параллельные ветви и последовательно соединенные части обмоток одного стержня реального трансформатора едиными обмотками, как было сказано выше;
- на схеме стороны трансформатора расставить направления векторов напряжения обмоток. Острие стрелки обращается к началу обмотки (обозначается на схемах звездочкой);
- расставить номера стержней магнитной системы в порядке следования фаз;
- пройти по схеме стороны реального трансформатора в направлении от ввода «А» к вводу «В», присвоить обмоткам реального трансформатора наименования обмоток обобщенной схемы по признакам лучевой и контурной частей и принадлежности к стержням магнитной системы. Обход вести от ввода «А» по лучевой части (если таковая имеется), затем кратчайшим путем по контурной части (если таковая имеется). Обход завершить в нейтральной точке стороны (если таковая точка имеется) или в точке соединения контурной части с лучевой частью, прилегающей к вводу «В». Если лучевая часть схемы отсутствует, обход завершить на вводе «В»;



– присвоить переменным W_{L1}, \dots, W_{C3} число витков обмоток реального трансформатора с соответствующим знаком. Знак «+» присваивается, если при обходе сначала встречается острое стрелки напряжения, а знак «-», если сначала встречается хвост стрелки. Если при обходе та или иная обмотка обобщенной схемы в схеме реального трансформатора не обнаруживается, то соответствующей переменной числа витков обобщенной схемы присваивается ноль.

Определение параметров обобщенной схемы

Система уравнений для напряжений обмоток обобщенной схемы, приведенной на рис. 1, в режимах симметричного и несимметричного питания имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} (\vec{U}_{L11} - \vec{U}_{L31} + \vec{U}_{C11}) + (\vec{U}_{L22} - \vec{U}_{L12} + \vec{U}_{C22}) + (\vec{U}_{L33} - \vec{U}_{L23} + \vec{U}_{C33}) &= \vec{U}_{AB}, \\ (\vec{U}_{L31} - \vec{U}_{L21} + \vec{U}_{C31}) + (\vec{U}_{L12} - \vec{U}_{L32} + \vec{U}_{C12}) + (\vec{U}_{L23} - \vec{U}_{L13} + \vec{U}_{C23}) &= \vec{U}_{BC}, \\ (\vec{U}_{L21} - \vec{U}_{L11} + \vec{U}_{C21}) + (\vec{U}_{L32} - \vec{U}_{L22} + \vec{U}_{C32}) + (\vec{U}_{L13} - \vec{U}_{L33} + \vec{U}_{C13}) &= \vec{U}_{CA}, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $\vec{U}_{L11} - \vec{U}_{C33}$ — вектора напряжений обмоток в соответствии с рис. 1;
 $\vec{U}_{AB}, \vec{U}_{BC}, \vec{U}_{CA}$ — вектора линейных напряжений стороны трансформатора.

Сумма линейных напряжений стороны трансформатора всегда равна нулю

$$\vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BC} + \vec{U}_{CA} = 0. \quad (3)$$

Обозначим векторные напряжения на виток обмотки стержня $\vec{V}_{t1}, \vec{V}_{t2}, \vec{V}_{t3}$. Сумма этих векторов равна векторному напряжению на виток нулевой последовательности \vec{V}_{t0}

$$\vec{V}_{t1} + \vec{V}_{t2} + \vec{V}_{t3} = \vec{V}_{t0}. \quad (4)$$

Вектор \vec{V}_{t0} будем считать заданным. Напряжения обмоток

$$\vec{U}_{L11} = W_{L11} \cdot \vec{V}_{t1} \dots \vec{U}_{C33} = W_{C33} \cdot \vec{V}_{t3}. \quad (5)$$

С учетом (5) система уравнений (2) принимает вид

$$\left\{ \begin{aligned} (W_{L1} - W_{L3} + W_{C1}) \cdot \vec{V}_{t1} + (W_{L2} - W_{L1} + W_{C2}) \cdot \vec{V}_{t2} + (W_{L3} - W_{L2} + W_{C3}) \cdot \vec{V}_{t3} &= \vec{U}_{AB}, \\ (W_{L3} - W_{L2} + W_{C3}) \cdot \vec{V}_{t1} + (W_{L1} - W_{L3} + W_{C1}) \cdot \vec{V}_{t2} + (W_{L2} - W_{L1} + W_{C2}) \cdot \vec{V}_{t3} &= \vec{U}_{BC}, \\ (W_{L2} - W_{L1} + W_{C2}) \cdot \vec{V}_{t1} + (W_{L3} - W_{L2} + W_{C3}) \cdot \vec{V}_{t2} + (W_{L1} - W_{L3} + W_{C1}) \cdot \vec{V}_{t3} &= \vec{U}_{CA}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Обозначим

$$\left\{ \begin{aligned} D1 &= W_{L1} + W_{L2} - 2 \cdot W_{L3} + W_{C1} - W_{C3}, \\ D2 &= W_{L2} + W_{L3} - 2 \cdot W_{L1} + W_{C2} - W_{C1}, \\ D3 &= W_{L3} + W_{L1} - 2 \cdot W_{L2} + W_{C3} - W_{C2}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Просуммировав (7), получим

$$D1 + D2 + D3 = 0. \quad (8)$$

Обозначим

$$D = D1^2 + D1 \cdot D2 + D2^2. \quad (9)$$

Произведем вычитание первого и второго уравнения, второго и третьего уравнения системы (6) и с учетом (3), (4), (7) и (8) получим систему уравнений для обобщенной схемы

$$\left\{ \begin{aligned} D1 \cdot \vec{V}_{t1} + D2 \cdot \vec{V}_{t2} - (D1 + D2) \cdot \vec{V}_{t3} &= 2 \cdot \vec{U}_{AB} + \vec{U}_{CA}, \\ -(D1 + D2) \cdot \vec{V}_{t1} + D1 \cdot \vec{V}_{t2} + D2 \cdot \vec{V}_{t3} &= -\vec{U}_{AB} - 2 \cdot \vec{U}_{CA}, \\ \vec{V}_{t1} + \vec{V}_{t2} + \vec{V}_{t3} &= \vec{V}_{t0}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Трансформатор в режиме симметричного и несимметричного питания

Рассмотрим трехфазный трансформатор, имеющий две стороны (рис. 3). Для первичной стороны используем обозначения (5), (7), (8), (9). Линейные напряжения вторичной стороны обозначим $\vec{U}_{ab}, \vec{U}_{bc}, \vec{U}_{ca}$, а число витков обмоток этой обобщенной схемы — w_{L1}, \dots, w_{C3} . Тогда параметры $d1, d2, d3$ и d этой обобщенной схемы определяются как

$$\begin{cases} d_1 = w_{L1} + w_{L2} - 2 \cdot w_{L3} + w_{C1} - w_{C3}, \\ d_2 = w_{L2} + w_{L3} - 2 \cdot w_{L1} + w_{C2} - w_{C1}, \\ d_3 = w_{L3} + w_{L1} - 2 \cdot w_{L2} + w_{C3} - w_{C2}, \\ d = d1^2 + d1 \cdot d2 + d2^2. \end{cases} \quad (11)$$

Уравнения, описывающие первичную сторону, полностью совпадают с (10). Уравнения для линейных напряжений вторичной стороны аналогичны (10), и после переноса неизвестных напряжений \vec{U}_{ab} , \vec{U}_{ca} в левую часть получаем систему уравнений

$$\begin{cases} D1 \cdot \vec{V}_{t1} + D2 \cdot \vec{V}_{t2} - (D1 + D2) \cdot \vec{V}_{t3} = 2 \cdot \vec{U}_{AB} + \vec{U}_{CA}, \\ -(D1 + D2) \cdot \vec{V}_{t1} + D1 \cdot \vec{V}_{t2} + D2 \cdot \vec{V}_{t3} = -\vec{U}_{AB} - 2 \cdot \vec{U}_{CA}, \\ \vec{V}_{t1} + \vec{V}_{t2} + \vec{V}_{t3} = \vec{V}_{t0}, \\ d1 \cdot \vec{V}_{t1} + d2 \cdot \vec{V}_{t2} - (d1 + d2) \cdot \vec{V}_{t3} - 2 \cdot \vec{U}_{ab} - \vec{U}_{ca} = 0, \\ -(d1 + d2) \cdot \vec{V}_{t1} + d1 \cdot \vec{V}_{t2} + d2 \cdot \vec{V}_{t3} + \vec{U}_{ab} + 2 \cdot \vec{U}_{ca} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Решение системы (12) с дополнением

$$\vec{U}_{bc} = -\vec{U}_{ab} - \vec{U}_{ca}$$

$$\begin{cases} \vec{V}_{t1} = \frac{1}{D} \cdot [D1 \cdot \vec{U}_{AB} + (D1 + D2) \cdot \vec{U}_{CA}] + \frac{1}{3} \cdot \vec{V}_{t0}, \\ \vec{V}_{t2} = \frac{1}{D} \cdot [D2 \cdot \vec{U}_{AB} - D1 \cdot \vec{U}_{CA}] + \frac{1}{3} \cdot \vec{V}_{t0}, \\ \vec{V}_{t3} = \frac{1}{D} \cdot [-(D1 + D2) \cdot \vec{U}_{AB} - D2 \cdot \vec{U}_{CA}] + \frac{1}{3} \cdot \vec{V}_{t0}, \\ \vec{U}_{ab} = \frac{1}{D} \cdot [(d1 \cdot D1 + d1 \cdot D2 + d2 \cdot D2) \cdot \vec{U}_{AB} + \\ + (d1 \cdot D2 - d2 \cdot D1) \cdot \vec{U}_{CA}], \\ \vec{U}_{ca} = \frac{1}{D} \cdot [(d2 \cdot D1 - d1 \cdot D2) \cdot \vec{U}_{AB} + \\ + (d1 \cdot D1 - d2 \cdot D1 + d2 \cdot D2) \cdot \vec{U}_{CA}], \\ \vec{U}_{bc} = \frac{-1}{D} \cdot [(d1 \cdot D1 + d2 \cdot D1 + d2 \cdot D2) \cdot \vec{U}_{AB} + \\ + (d1 \cdot D1 + d1 \cdot D2 + d2 \cdot D2) \cdot \vec{U}_{CA}]. \end{cases} \quad (13)$$

Определим, при каких условиях $D=0$ и (12) не имеет решения. Используя (7), получаем

$$w_{L1} = w_{L2} = w_{L3}; \quad w_{C1} = w_{C2} = w_{C3}. \quad (14)$$

При выполнении (14) линейные напряжения стороны всегда равны нулю. Обобщенную схему с такими параметрами назовем вырожденной. Такая схема не способна принимать и передавать энергию и в реальных трансформаторах никогда не применяется.

Согласно (13) вектор \vec{V}_{t0} в формулы для определения вторичных линейных напряжений не входит. Таким образом, составляющая нулевой последовательности в интересующих нас линейных напряжениях вторичной стороны отсутствует, поэтому нет необходимости знать конкретную величину вектора \vec{V}_{t0} .

Трансформатор в режиме симметричного трехфазного питания

При симметричном трехфазном питании (см. рис. 3) линейное напряжение \vec{U}_{CA} можно выразить через линейное напряжение \vec{U}_{AB}

$$\vec{U}_{CA} = \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \vec{U}_{AB}. \quad (15)$$

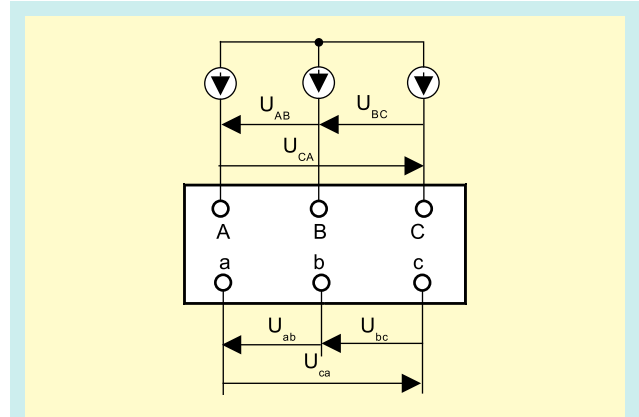


Рис. 3. Двухобмоточный трансформатор в режиме симметричного трехфазного питания

Подставив (15) в (14) и выполнив преобразования, получим

$$\vec{U}_{ab} = \frac{\vec{U}_{AB}}{2 \cdot D} \cdot [(2 \cdot d1 \cdot D1 + d2 \cdot D1 + d1 \cdot D2 + 2 \cdot d2 \cdot D2) + j \cdot \sqrt{3} \cdot (d1 \cdot D2 - d2 \cdot D1)]. \quad (16)$$

Линейный векторный коэффициент трансформации согласно (1)

$$\vec{K\vec{T}} = \frac{\vec{U}_{AB}}{\vec{U}_{ab}} = KT \cdot \exp(-j \cdot \phi). \quad (17)$$

Подставив (16) в (17) и выполнив преобразования, получим

$$\vec{K\vec{T}} = \sqrt{\frac{D}{d}} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \sqrt{D} \cdot d} \cdot (2 \cdot d1 \cdot D1 + d2 \cdot D1 + d1 \cdot D2 + 2 \cdot d2 \cdot D2) + \frac{-j \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{D} \cdot d} \cdot (d1 \cdot D2 - d2 \cdot D1) \right]. \quad (18)$$

Сопоставив (18) и (17), получим линейный коэффициент трансформации

$$KT = |\vec{K\vec{T}}| = \sqrt{\frac{D}{d}} = \sqrt{\frac{D1^2 + D1 \cdot D2 + D2^2}{d1^2 + d1 \cdot d2 + d2^2}}. \quad (19)$$

Аналогично получаем фазовый угол линейных напряжений

$$\phi = \text{Arctan} \left[\frac{\sqrt{3} \cdot (d1 \cdot D2 - d2 \cdot D1)}{(2 \cdot d1 + d2) \cdot D1 + (d1 + 2 \cdot d2) \cdot D2} \right]. \quad (20)$$

Угол ϕ ищется в пределах $0 \leq \phi < 360^\circ$ с учетом знаков числителя и знаменателя дроби в формуле (20). Группа соединения обмоток Φ (угол между векторами первичного и вторичного линейных напряжений, отсчитываемый в направлении против часовой

стрелки, в делениях циферблата часов) определяет-ся по формуле

$$\Phi = 12 - \frac{\phi}{30}. \quad (21)$$

Формулы (19)-(21) позволяют по схеме и числу обмоток определить линейный коэффициент трансформации и группу соединения обмоток любого трансформатора, не прибегая к построению векторной диаграммы и тригонометрическим преобразованиям. Эти формулы могут быть легко реализованы в соответствующих компьютерных программах.

Трансформатор в режиме несимметричного однофазного питания

Схема рассматриваемого режима приведена на рис. 4. В этом режиме

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_S, \quad \vec{U}_{BC} = 0, \quad \vec{U}_{CA} = -\vec{U}_S. \quad (22)$$

Подставив (22) в (13), получим напряжения вторичной стороны

$$\begin{cases} \vec{U}_{ab} = 1/D \cdot (d1 \cdot D1 + d2 \cdot D1 + d2 \cdot D2) \cdot \vec{U}_S, \\ \vec{U}_{ca} = -1/D \cdot (d1 \cdot D1 + d1 \cdot D2 + d2 \cdot D2) \cdot \vec{U}_S, \\ \vec{U}_{bc} = 1/D \cdot (-d2 \cdot D1 + d1 \cdot D2) \cdot \vec{U}_S. \end{cases} \quad (23)$$

Существует три однофазных коэффициента трансформации (см. рис. 4)

$$\begin{cases} \vec{K}_{t1} = \frac{\vec{U}_{ab}}{\vec{U}_S} = \frac{1}{D} \cdot (d1 \cdot D1 + d2 \cdot D1 + d2 \cdot D2), \\ \vec{K}_{t2} = \frac{\vec{U}_{ca}}{\vec{U}_S} = \frac{-1}{D} \cdot (d1 \cdot D1 + d1 \cdot D2 + d2 \cdot D2), \\ \vec{K}_{t3} = \frac{\vec{U}_{bc}}{\vec{U}_S} = \frac{1}{D} \cdot (-d2 \cdot D1 + d1 \cdot D2). \end{cases} \quad (24)$$

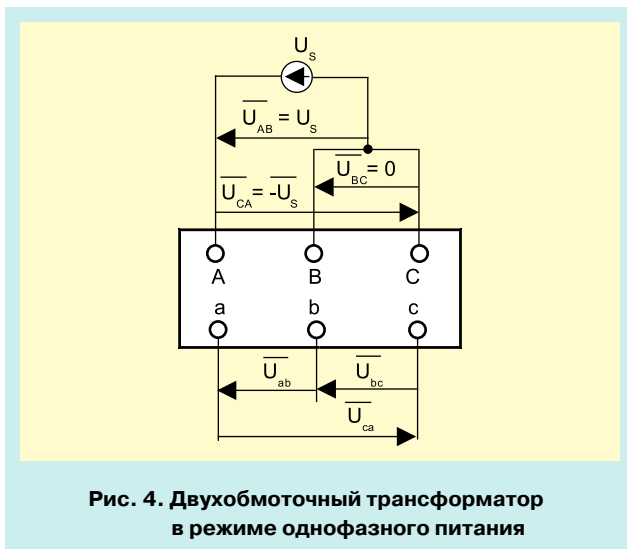


Рис. 4. Двухобмоточный трансформатор в режиме однофазного питания

Коэффициенты $\vec{K}_{t1}, \vec{K}_{t2}, \vec{K}_{t3}$ являются отношениями линейных напряжений вторичной и первичной сторон. Смысл этого обратного отношения станет ясным позже. Знак вектора означает, что эти коэффициенты могут принимать положительные и отрицательные значения. Между коэффициентами имеет место соотношение

$$\vec{K}_{t1} + \vec{K}_{t2} + \vec{K}_{t3} = 0. \quad (25)$$

Определим значение следующего выражения с использованием (25)

$$\frac{1}{\sqrt{\vec{K}_{t1}^2 + \vec{K}_{t1} \cdot \vec{K}_{t2} + \vec{K}_{t2}^2}} = \sqrt{\frac{D1^2 + D1 \cdot D2 + D2^2}{d1^2 + d1 \cdot d2 + d2^2}}. \quad (26)$$

Сравнив (26) с (19), получим формулу для определения линейного коэффициента трансформации КТ при симметричном трехфазном питании по двум коэффициентам $\vec{K}_{t1}, \vec{K}_{t2}$. Аналогично получаем формулы, в которых используются две другие пары однофазных коэффициентов трансформации

$$\begin{aligned} \text{КТ} &= \frac{1}{\sqrt{\vec{K}_{t1}^2 + \vec{K}_{t1} \cdot \vec{K}_{t2} + \vec{K}_{t2}^2}} = \frac{1}{\sqrt{\vec{K}_{t1}^2 + \vec{K}_{t1} \cdot \vec{K}_{t3} + \vec{K}_{t3}^2}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\vec{K}_{t2}^2 + \vec{K}_{t2} \cdot \vec{K}_{t3} + \vec{K}_{t3}^2}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Определим значение следующего выражения с использованием (24)

$$\frac{\sqrt{3} \cdot (\vec{K}_{t2} + \vec{K}_{t1})}{\vec{K}_{t2} - \vec{K}_{t1}} = \frac{\sqrt{3} \cdot (d1 \cdot D2 - d2 \cdot D1)}{(2 \cdot d1 + d2) \cdot D1 + (d1 + 2 \cdot d2) \cdot D2}. \quad (28)$$

Сравнив (28) с (20), получим формулу для определения фазового угла линейных напряжений ϕ при симметричном трехфазном питании по двум коэффициентам трансформации $\vec{K}_{t1}, \vec{K}_{t2}$. Аналогично получаем формулы с использованием двух других пар коэффициентов

$$\begin{aligned} \phi &= \text{Arctan} \left[\frac{\sqrt{3} \cdot (\vec{K}_{t2} + \vec{K}_{t1})}{\vec{K}_{t2} - \vec{K}_{t1}} \right] = \text{Arctan} \left[\frac{\sqrt{3} \cdot \vec{K}_{t3}}{2 \cdot \vec{K}_{t1} + \vec{K}_{t3}} \right] = \\ &= \text{Arctan} \left[\frac{-\sqrt{3} \cdot \vec{K}_{t3}}{2 \cdot \vec{K}_{t2} + \vec{K}_{t3}} \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

Группа соединения обмоток Φ определяется по (21). Полученные формулы (27), (28) и (21) позволяют определить трехфазный линейный коэффициент трансформации, фазовый угол линейных напряжений и группу соединения обмоток при симметричном трехфазном питании по рассчитанным или измеренным однофазным коэффициентам трансформации $\vec{K}_{t1}, \vec{K}_{t2}, \vec{K}_{t3}$.

Обратная задача

При проведении измерений коэффициент трансформации КТ и группа соединения Φ известны

из расчета или паспорта трансформатора. Поэтому актуальна обратная задача — по известным КТ и Φ найти ожидаемые значения коэффициентов \vec{K}_{tr1} , \vec{K}_{tr2} , \vec{K}_{tr3} . Затем необходимо измерить эти коэффициенты, а при несовпадении ожидаемых и измеренных значений определить по измеренным коэффициентам фактические КТ, ϕ и Φ . Решение обратной задачи будем искать в виде приведенных однофазных коэффициентов трансформации

$$\vec{K}_{tr1} = \text{КТ} \cdot \vec{K}_{t1}, \quad \vec{K}_{tr2} = \text{КТ} \cdot \vec{K}_{t2}, \quad \vec{K}_{tr3} = \text{КТ} \cdot \vec{K}_{t3}. \quad (30)$$

Коэффициенты \vec{K}_{tr1} , \vec{K}_{tr2} , \vec{K}_{tr3} являются коэффициентами трансформации приведенного трансформатора с $U_{L1} = U_{L2}$ и $\text{КТ} = 1$.

Подставим (30) в (27) и (29) и после преобразования получим систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\vec{K}_{tr1}^2 + \vec{K}_{tr2} \cdot \vec{K}_{tr1} + \vec{K}_{tr2}^2}} = 1, \\ \frac{\sqrt{3} \cdot (\vec{K}_{tr2} + \vec{K}_{tr1})}{\vec{K}_{tr2} - \vec{K}_{tr1}} = \tan(\phi). \end{cases} \quad (31)$$

Решение системы (31) и аналогичные решения систем уравнений для двух других пар приведенных однофазных коэффициентов

$$\begin{cases} \vec{K}_{tr1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \cos(30^\circ + \phi) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \cos(30^\circ - 30^\circ \cdot \Phi), \\ \vec{K}_{tr2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \cos(150^\circ + \phi) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \cos(150^\circ - 30^\circ \cdot \Phi), \\ \vec{K}_{tr3} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \cos(270^\circ + \phi) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \cos(270^\circ - 30^\circ \cdot \Phi). \end{cases} \quad (32)$$

Подстановка (32) в (31) подтверждает правильность найденного решения. Теперь становится понятным смысл определения коэффициентов трансформации \vec{K}_{t1} , \vec{K}_{t2} , \vec{K}_{t3} в форме (24). В такой форме эти коэффициенты имеют более удобную зависимость от углов ϕ , Φ .

Полученное решение (32) имеет логичную интерпретацию в виде векторной диаграммы напряжений обмоток трансформатора. Такая диаграмма для двухобмоточного трансформатора с коэффициентом трансформации $\text{КТ} = 1$ приведена на рис. 5. На этой диаграмме вектора напряжений в режиме однофазного питания «А-(В+С)» имеют индексы «1», а в режиме симметричного трехфазного питания — индексы «3». Как видно из решения (32) и векторной диаграммы, напряжения в режиме однофазного питания являются проекциями соответствующих векторов напряжений в режиме трехфазного питания на ось напряжения ОА.

Определение линейных коэффициентов трансформации и группы соединения по результатам измерений однофазных коэффициентов трансформации

При испытаниях удобнее измерять однофазные коэффициенты трансформации \vec{K}_{T1} , \vec{K}_{T2} , \vec{K}_{T3}

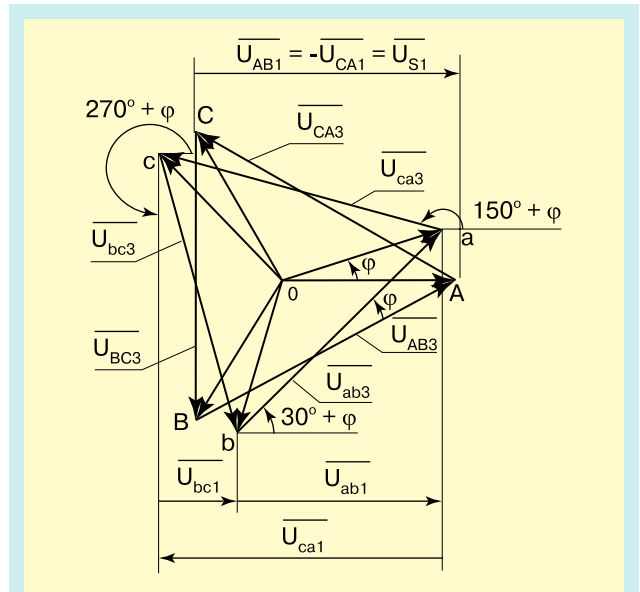


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений трансформатора с КТ=1 в режимах симметричного трехфазного и однофазного питания

$$\text{КТ}1 = U_{ab1}/U_{S1}; \quad \text{КТ}2 = U_{ca1}/U_{S1}; \quad \text{КТ}3 = U_{bc1}/U_{S1}$$

$$\begin{cases} \vec{K}_{T1} = \frac{\vec{U}_s}{U_{ab}} = \frac{1}{K_{t1}} = \frac{\text{КТ}}{K_{tr1}}, \\ \vec{K}_{T2} = \frac{\vec{U}_s}{U_{ca}} = \frac{1}{K_{t2}} = \frac{\text{КТ}}{K_{tr2}}, \\ \vec{K}_{T3} = \frac{\vec{U}_s}{U_{bc}} = \frac{1}{K_{t3}} = \frac{\text{КТ}}{K_{tr3}}. \end{cases} \quad (33)$$

Согласно (32) и (33) для некоторых групп соединения могут быть измерены только два коэффициента трансформации из трех

- для групп «0» и «6» — коэффициенты \vec{K}_{T1} , \vec{K}_{T2} , ($\vec{K}_{T3} = \infty$);
- для групп «2» и «8» — коэффициенты \vec{K}_{T1} , \vec{K}_{T3} , ($\vec{K}_{T2} = \infty$);
- для групп «4» и «10» — коэффициенты \vec{K}_{T2} , \vec{K}_{T3} , ($\vec{K}_{T1} = \infty$).

Перед измерениями необходимо определить ожидаемые расчетные значения коэффициентов трансформации $\vec{K}_{T1_расч}$, $\vec{K}_{T2_расч}$, $\vec{K}_{T3_расч}$ по формулам (33) и (32). Необходимо и достаточно выполнить измерения одной из трех пар коэффициентов \vec{K}_{T1} и \vec{K}_{T2} , \vec{K}_{T2} и \vec{K}_{T3} , \vec{K}_{T1} и \vec{K}_{T3} для трех вариантов питания

- при питании «А-(В+С)»

$$\vec{K}_{T1} = \frac{\vec{U}_s}{U_{ab}}; \quad \vec{K}_{T2} = \frac{\vec{U}_s}{U_{ca}}; \quad \vec{K}_{T3} = \frac{\vec{U}_s}{U_{bc}}$$

- при питании «B-(C+A)»

$$\vec{KT1} = \frac{\vec{U}_s}{\vec{U}_{bc}}; \quad \vec{KT2} = \frac{\vec{U}_s}{\vec{U}_{ab}}; \quad \vec{KT3} = \frac{\vec{U}_s}{\vec{U}_{ca}}$$

- при питании «C-(A+B)»

$$\vec{KT1} = \frac{\vec{U}_s}{\vec{U}_{ca}}; \quad \vec{KT2} = \frac{\vec{U}_s}{\vec{U}_{bc}}; \quad \vec{KT3} = \frac{\vec{U}_s}{\vec{U}_{ab}}$$

При измерении этих коэффициентов необходимо определять знак по группе соединения измеряемой однофазной схемы (группа «0» — знак «+», группа «6» — знак «-»). Знак может быть определен и по-другому, например, методом трех вольтметров.

Линейные коэффициенты трансформации, фазовые углы и группы соединения обмоток определяются по результатам измерений для каждого из трех вариантов однофазного питания по формулам (34), (35) и (36). В правильно спроектированном, качественно изготовленном и исправном трансформаторе линейные коэффициенты трансформации и группы соединения для всех трех вариантов однофазного питания должны совпадать между собой в пределах погрешности измерения.

Предложенная методика расчета и измерения коэффициента трансформации была проверена экспериментально при изготовлении и вводе в эксплуатацию целого ряда трансформаторов, которые имели группы соединения обмоток 0,25; 0,5; 5,75; 6,25; 11,5; 11,75 и т.п.

Проверка справедливости основных расчетных формул для трехфазных трансформаторов с другой компоновкой

Вывод расчетных формул касался трансформатора, имеющего две стороны с произвольной схемой соединения обмоток. Была выполнена проверка расчетных формул и для других вариантов:

- трехобмоточный трансформатор и автотрансформатор;
- агрегат из двух трансформаторов с каскадным соединением обмоток;
- агрегат из двух трансформаторов с соединением обмоток по вольтодобавочной схеме.

Выкладки этих проверок в символьном виде невозможно вместить в рамки данной статьи.

Автор выражает уверенность, что редко применяющиеся схемы трансформаторных агрегатов с обратными связями по третичным обмоткам и т.п., также подчиняются основным расчетным формулам и готов выполнить символьную проверку любых более сложных схем, которые представят интерес, а результаты проверки сообщить по E-mail.

Теорема о коэффициентах трансформации и группе соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Выше было доказано в символьном виде, что для всех применяющихся схем обмоток трехфазных

трансформаторов и агрегатов справедливы общие соотношения между коэффициентами трансформации при однофазном питании, линейным коэффициентом трансформации при трехфазном питании и группой соединения обмоток. Это общее свойство полезно сформулировать в виде «трансформаторной теоремы». Формулы в тексте теоремы получены путем преобразования (27) и (29) с учетом (33).

Теорема. В трехфазном трансформаторе или агрегате с любой схемой и группой соединения обмоток сторон на холостом ходу, даже при наличии составляющей нулевой последовательности в магнитных потоках стержней магнитной системы, линейный коэффициент трансформации КТ (отношение линейных напряжений первичной и вторичной сторон при трехфазном симметричном питании), фазовый угол φ (угол между векторами линейных напряжений первичной и вторичной сторон при трехфазном симметричном питании) и группа соединения обмоток Φ связаны с тремя коэффициентами трансформации $\vec{KT1}$, $\vec{KT2}$, $\vec{KT3}$, определенными с учетом полярности напряжений первичной и вторичной сторон при однофазном питании по схеме, приведенной на рис. 4, следующими формулами (с точностью до неизбежных потерь напряжения на сопротивлении обмоток от тока холостого хода):

$$KT = \frac{\vec{KT1} \cdot \vec{KT2}}{\sqrt{\vec{KT1}^2 + \vec{KT1} \cdot \vec{KT2} + \vec{KT2}^2}} = \frac{\vec{KT1} \cdot \vec{KT3}}{\sqrt{\vec{KT1}^2 + \vec{KT1} \cdot \vec{KT3} + \vec{KT3}^2}} = \frac{\vec{KT2} \cdot \vec{KT3}}{\sqrt{\vec{KT2}^2 + \vec{KT2} \cdot \vec{KT3} + \vec{KT3}^2}}; \tag{34}$$

$$\phi = \text{Arctan} \left[\frac{\sqrt{3} \cdot (\vec{KT1} + \vec{KT2})}{\vec{KT1} - \vec{KT2}} \right] = \text{Arctan} \left[\frac{\sqrt{3} \cdot \vec{KT1}}{\vec{KT1} + 2 \cdot \vec{KT3}} \right] = \text{Arctan} \left[\frac{-\sqrt{3} \cdot \vec{KT2}}{\vec{KT2} + 2 \cdot \vec{KT3}} \right]; \tag{35}$$

$$\Phi = 12 - \frac{\phi}{30}. \tag{36}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексенко Г.В., Ашрятов А.К., Фрид Е.С. Испытания высоковольтных и мощных трансформаторов. М.: Госэнергоиздат, 1963. 672 с.
2. ГОСТ 3484.1-88. Методы электромагнитных испытаний. 33 с.

Зайцев Владимир Алексеевич — начальник лаборатории электродинамики отдела электромагнитных исследований Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ОАО «ВИТ»), г. Запорожье (38061) 2845318 postmaster@vit.zp.ua

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ УВН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Чорноготский В.М., канд. техн. наук,
Джунь Л.П., канд. техн. наук

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований электрической прочности изоляции маслонаполненных силовых трансформаторов УВН, выполненных в ОАО «ВИТ». На основе исследований разработана методология выборов, специальное программно-методическое обеспечение и руководящие материалы по расчетам и выбору изоляции. Основой методологии являются экспериментальные зависимости минимальных пробивных напряженностей масляных каналов различных участков внутренней изоляции трансформаторов УВН при воздействии одночасового и одноминутного напряжений промышленной частоты, коммутационного и полного грозового импульсов. Воздействующие напряженности определяются по программе ELAX-D и сравниваются с минимальными пробивными путем использования динамически подключаемых библиотек (программы ENDINS, MIDINS, ENDINS2, BUSHING). Расчеты распределения импульсных напряжений выполняются по программе VLN, а коэффициенты запаса — с использованием базы данных COILINS. Электрическая прочность витковой изоляции рассчитывается по программе TURNINS.

Ключевые слова: трансформаторы; внутренняя изоляция; масляные каналы; ультравысокое напряжение; электрическая прочность; частичные разряды; коэффициенты запаса

При создании трансформаторного оборудования УВН (750 кВ и выше) переменного тока для заданных рабочего и испытательных напряжений и габаритов транспортирования ставятся цели повышения мощности в единице изделия, получения высоких технико-экономических характеристик и обеспечения надежности в эксплуатации, что в значительной степени определяется размерами и конструкцией изоляции.

При разработке изоляции трансформаторов и реакторов УВН решается комплекс сложных задач, таких как:

- обеспечение достаточной электрической прочности всех участков внутренней и внешней изоляции оборудования при рабочем и испытательных напряжениях в процессе проектирования;
- успешные испытания изделий на заводе-изготовителе при обеспечении высокой культуры производства и соблюдении технологии изготовления, сборки и термовакуумной обработки изоляции;
- обеспечение надежности в эксплуатации в течение нормированного срока службы оборудования.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основными участками внутренней изоляции, определяющими электрическую прочность изоляции трансформатора в целом, являются:

- витковая изоляция обмоток;
- изоляция между катушками обмоток;
- изоляция между обмотками в зоне середины высоты обмотки ВН (высокого напряжения) при вводе линейного конца в середину высоты обмотки;
- изоляция между обмотками в зоне края обмотки при вводе линейного конца обмотки с конца обмотки;
- изоляция снаружи обмотки в зоне середины высоты обмотки ВН;
- изоляция снаружи обмотки в зоне края обмотки;
- изоляция отводов;
- изоляция, окружающая нижнюю (масляную) часть ввода;
- изоляция установки ввода.

В трансформаторах СВН и УВН наибольшее распространение получила изоляция маслобарьерного типа (МБИ). Электрическая прочность масла значительно меньше электрической прочности твердых изоляционных материалов (картона, бумаги и др.), а поскольку напряженности распределяются обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям материалов, то наиболее слабым звеном изоляции оказываются масляные каналы (прослойки) между изоляционными деталями. Электрическая прочность масляных каналов (прослоек) зависит от конструкции, размера, характеристик материалов, вида испытательного напряжения.

Повреждающие напряженности масляных каналов различных участков изоляции могут быть получены путем экспериментальных исследований моделей изоляции. Воздействующие напряженности в масляных каналах изоляционной конструкции определяются расчетом электрического поля. По методике ВИТ расчетные коэффициенты запаса электрической прочности масляных каналов изоляции определяются как отношение минимальной пробивной напряженности к действующей напряженности. Знание коэффициентов запаса электрической прочности масляных каналов изоляции трансформаторов УВН является одним из условий ее оптимизации.

1.1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Методы исследований электрической прочности внутренней изоляции, выполненных в ОАО «ВИТ», состоят в следующем.

- За напряжение пробоя модели принимается напряжение искрового пробоя масляного канала, который сопровождается скачком интенсивности частичных разрядов (ЧР), свечением, звуком в баке, иногда искажением формы воздействующего напряжения

- Для определения пробивных напряжений при каждом виде испытательного напряжения испытывается не менее 10 моделей каждого участка изоляции

- Модели участков изоляции должны воспроизводить характеристики электрического поля соответствующего участка изоляции трансформатора, конструкцию деталей, формирующих масляные каналы (прослойки), качество изоляционных материалов (бумаг, электрокартона, трансформаторного масла) и технологии изготовления, включая термовакуумную обработку

- Исследования электрической прочности проводятся с регистрацией частичных разрядов (ЧР) как при воздействии одночасового и одноминутного напряжений промышленной частоты, так и коммутационного и полного грозового импульсов.

1.2. МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Модели участков изоляции воспроизводят наиболее важные конструктивные элементы маслбарьерной изоляции (масляный канал в зоне середины обмотки, канал у емкостного кольца и между угловыми шайбами зоны края обмотки) и межкатушечной изоляции (масляный канал между катушками непрерывной и переплетенной обмотки). Главное изоляционное расстояние моделей 25-50 мм. На моделях участков изоляции воспроизводятся структура изоляции и структура электрического поля элемента изоляции трансформатора. Модели по конструкции просты, по габаритам невелики, в связи с чем не требуются больших затрат времени на изготовление, сборку и испытание таких моделей. Модели участка изоляции позволяют осуществить статистический подход к исследованиям внутренней изоляции трансформаторов. Испытано 3180 различных моделей участков изоляции. Недостатком моделей участков изоляции является невозможность воспроизведения конструктивных особенностей сложных узлов изоляции (например, изоляции снаружи обмотки, изоляции установки ввода).

Модель изоляции узла воспроизводит в масштабе, близком к единице, изоляцию соответствующего узла (как правило, изоляцию между обмотками или снаружи обмотки в зоне середины или края обмотки). Модель изоляции узла собирается на металлическом каркасе без остова. Испытано 126 различных моделей изоляции узла.

Комплексная модель имеет остов и воспроизводит в масштабе, близком к единице, один стержень трансформатора со всеми элементами главной и продольной изоляции. На комплексной модели могут одновременно воспроизводиться также такие узлы изоляции,

как «обмотка – стенка бака», «обмотка – ввод», «ввод – заземленные части».

Масштаб, близкий к единице, означает, что в модели и разрабатываемом трансформаторе должны быть одинаковы исследуемые изоляционные промежутки, детали, из которых эти изоляционные промежутки собираются, масляные каналы между обмотками и барьерами и между барьерами (цилиндрами и угловыми шайбами); размеры продольной изоляции. Одинаковыми должны быть также технология изготовления обмоток и изоляции и технология термовакуумной обработки изоляции. Испытано 75 комплексных моделей.

Недостатком моделей узлов и комплексных моделей является невозможность накопления большого объема экспериментальных данных ввиду их сложности и дороговизны.

1.3. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

1.3.1. Витковая изоляция

Обмотка УВН, как правило, является переплетенной. В переплетенной обмотке воздействие на витковую изоляцию примерно равно напряжению одной катушки. Поскольку вольт-секундная характеристика витковой изоляции приближается к вольт-временной характеристике действующих в эксплуатации напряжений только в зоне коротких импульсов и длительного рабочего напряжения [1], то, наряду с обеспечением достаточной электрической прочности при испытательных напряжениях решающую роль при выборе толщины витковой изоляции имеет допустимое значение рабочей напряженности.

По конструктивному исполнению витковая изоляция испытанных обмоточных проводов представляет собой ленточную бумажно-масляную изоляцию, особенностью которой является неравномерное распределение масляных прослоек по толщине изоляции, вызванное прямоугольной формой обмоточных проводов и, как следствие, естественным разбуханием изоляции (рис. 1). Пробой изоляции обмоточных проводов начинается с пробоя масляных прослоек вблизи середины плоской части провода или с пробоя масляных клиньев между краями соседних проводов. Полный пробой развивается после интенсивных пробоев масляных прослоек и клиньев и сопровождается ростом уровня ЧР. Среднее значение напряжения появления ЧР составляет 50-70% среднего напряжения полного пробоя.

На основе многолетних исследований электрической прочности витковой изоляции определены допустимые напряженности с учетом качества обработки поверхности провода, марки изоляционной бумаги и режима технологической обработки изоляции.

Допустимые напряженности в витковой изоляции определены при воздействиях

- напряжения грозовых импульсов длительностью от 1 до 50 мкс;
- напряжения коммутационного импульса 250/2500 мкс;
- кратковременного напряжения промышленной частоты;
- одночасового напряжения промышленной частоты;
- длительного рабочего напряжения.

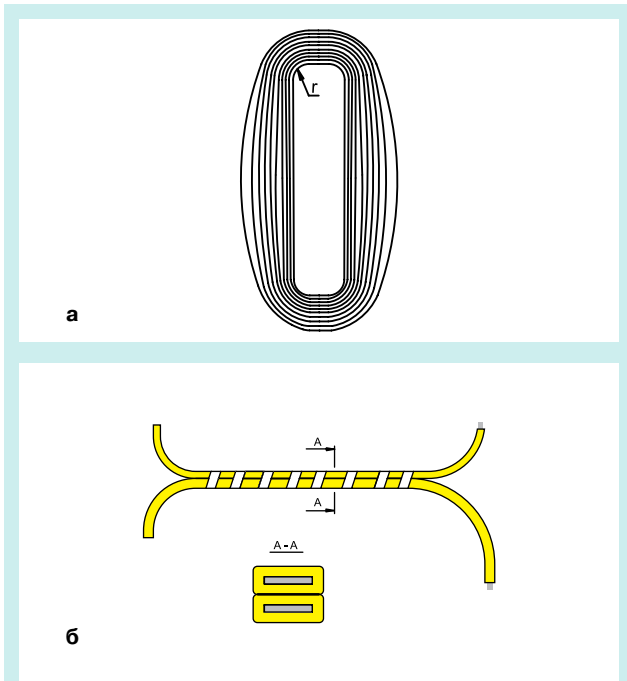


Рис. 1. Образец витковой изоляции

а — строение изоляции обмоточного провода,
б — конструкция образца

1.3.2. Воспроизведение на моделях особенностей электрического поля в изоляции между катушками обмоток

Для воспроизведения конструктивных особенностей и особенностей электрического поля в межкатушечной изоляции разработаны модели межкатушечной изоляции непрерывной и переплетенной обмоток. В модели межкатушечной изоляции непрерывной обмотки исследуемый промежуток находится между двумя парами катушек (рис. 2).

В модели межкатушечной изоляции переплетенной обмотки воспроизведена также разность напряжения между соседними витками переплетенной обмотки трансформатора (рис. 3).

Пробивные напряжения определены по искровому пробую масляного канала.

При исследовании электрической прочности межкатушечной изоляции проведено 98 опытов при одночасовом напряжении, 172 опыта при одноминутном, 289 опытов при коммутационном импульсе, 336 опытов при полном грозовом импульсе 4/50 мкс для непрерывной обмотки и 340 опытов для переплетенной обмотки, 214 опытов при полном грозовом импульсе 2,5/15 мкс.

На основе полученного объема экспериментальных данных разработана база данных для расчетов электрической прочности изоляции между катушками.

1.3.3. Исследования электрической прочности маслябарьерной изоляции в зоне середины обмотки с воспроизведением осевой составляющей электрического поля

Известно, что критические ЧР в маслябарьерной изоляции возникают, прежде всего, в масляном канале у

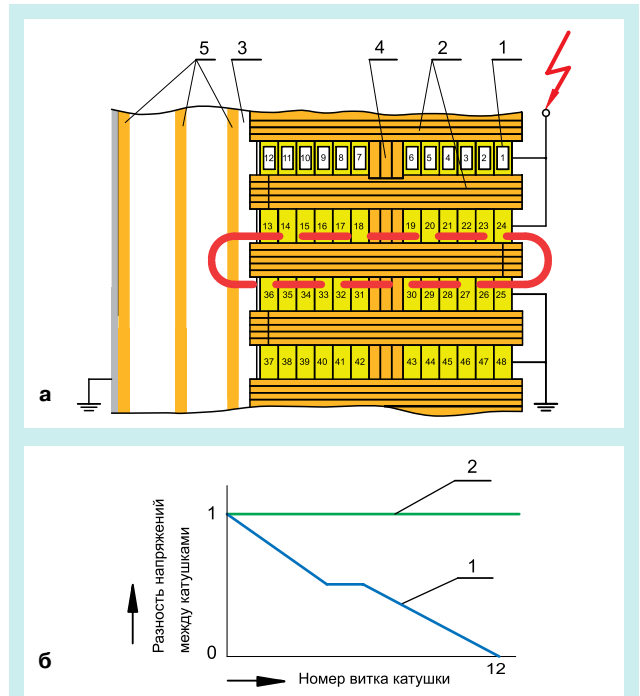


Рис. 2. Модель изоляции между катушками непрерывной обмотки

а — модель

1 — витковая изоляция, 2 — горизонтальные прокладки,
3 — прошивные рейки, 4 — П-образные прокладки,
5 — изоляционные цилиндры

б — разность напряжений между катушками

1 — в трансформаторе, 2 — в модели

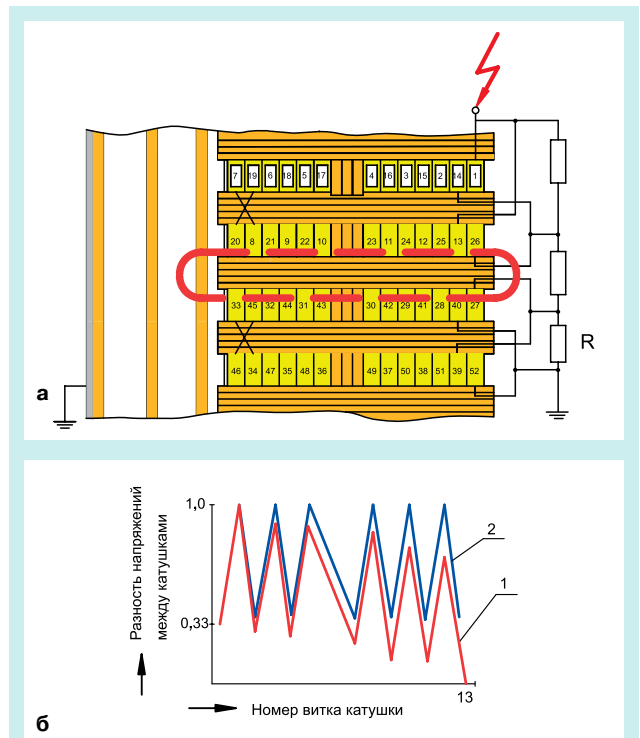


Рис. 3. Модель изоляции между катушками переплетенной обмотки

а — модель, б — разность напряжений между катушками

обмотки высокого напряжения, где электрическое поле неоднородно вследствие несплошности обмотки, расположения в канале прокладок и реек, имеющих повышенную диэлектрическую проницаемость, и наличия осевой составляющей электрического поля. Для выявления влияния осевой составляющей напряженности электрического поля на электрическую прочность масляного канала у обмотки были проведены сравнительные исследования моделей без осевой составляющей напряженности и моделей с осевой составляющей напряженности. Электрическое поле в масляном канале у обмотки ВН приведено на рис. 4. Осевая составляющая электрического поля в модели создавалась путем специального соединения катушек обмотки и подключения к ним регулировочных конденсаторов (рис. 5).

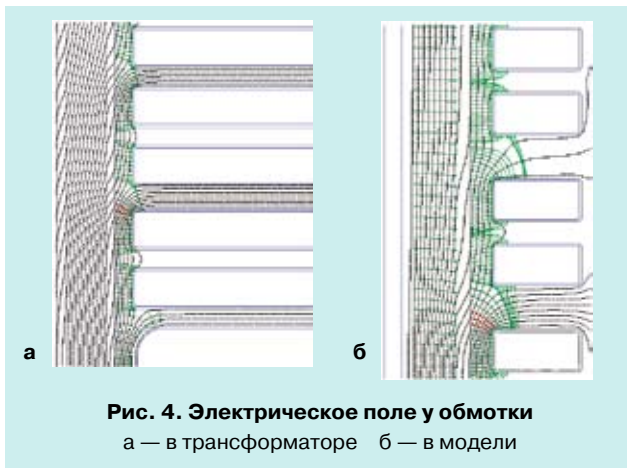


Рис. 4. Электрическое поле у обмотки
а — в трансформаторе б — в модели

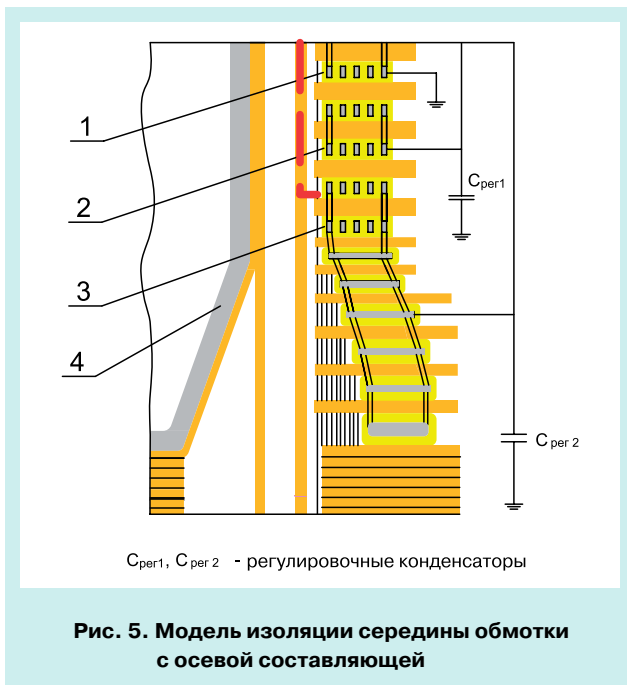


Рис. 5. Модель изоляции середины обмотки с осевой составляющей

При всех видах испытательных напряжений исследована электрическая прочность масляных каналов размером 5-7 мм, минимальных для трансформаторов СВН и УВН с точки зрения охлаждения и технологии изготовления. Экспериментально установлено снижение электрической прочности масляного канала

у обмотки при наличии осевого поля обмотки по сравнению с обмоткой, имеющей только радиальное поле.

Правомерность переноса результатов исследования моделей на реальные трансформаторы вытекает не только из подобия характеристик электрического поля в канале у обмотки модели, но и из воспроизведения конструкции и технологии изготовления элементов изоляции, образующих масляный канал.

Снижение электрической прочности масляного канала у обмотки, вызванное влиянием осевого поля обмотки, учитывается в методике расчета электрической прочности изоляции между обмотками в зоне середины.

1.3.4. Изоляция между обмотками в зоне края обмоток

Маслобарьерная изоляция края обмотки обычно состоит из изолированного емкостного кольца (ЕК), улучшающего электрическое поле края обмотки, вертикальных (как правило, цилиндрических) и горизонтальных (обычно плоских) барьеров, дополняемых прямыми или обратными угловыми шайбами. Между элементами изоляции края обмотки (между ЕК и ближайшей угловой шайбой, между угловыми шайбами, между угловой шайбой и барьером, между барьерами и др.) образуются многочисленные масляные каналы, имеющие сложное электрическое поле и различные размеры (рис. 6). Опыт исследований указывает на возможность начала пробоя изоляции края не только в канале у обмотки, но и в масляных каналах между удаленными от обмотки элементами изоляции.



Рис. 6. Электрическое поле вблизи емкостного кольца у края обмотки

Для исследований электрической прочности изоляции края обмотки использованы комплексные модели, модели узла изоляции и модели участка изоляции обмотки.

Исследовались модели с масляным каналом у ЕК 8 и 12 мм и с масляным каналом между угловыми шайбами 36 мм (рис. 7).

На комплексных моделях и моделях узла изоляции края обмоток исследован весь диапазон размеров масляных каналов до выдерживаемого уровня испытательных напряжений. Пробои масляного канала на комплексных моделях получены лишь в отдельных случаях. Модели узлов изоляции позволили отразить влияние на электрическую прочность масляных каналов не только

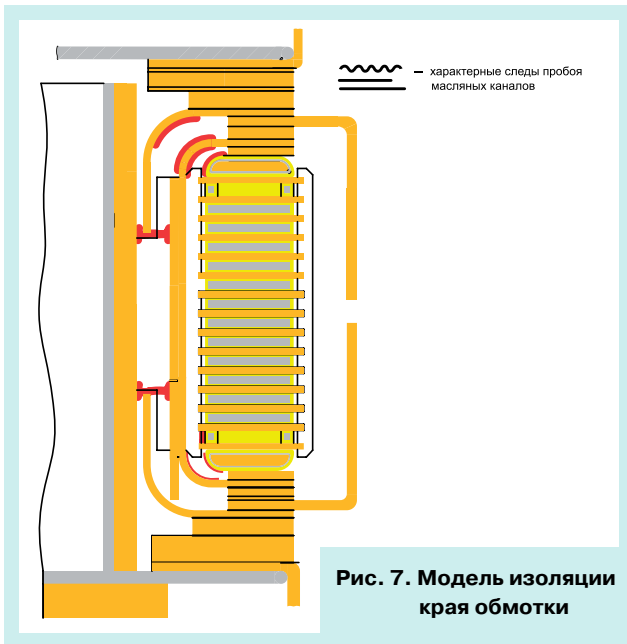


Рис. 7. Модель изоляции края обмотки

конструктивных и технологических особенностей изоляции края обмотки, но и статистический разброс размера масляных каналов вдоль длины окружности. Суммарное число моделей узлов изоляции, исследованных при каждом виде испытательных напряжений, превышало 10.

Результаты исследований позволили получить экспериментальные закономерности электрической прочности масляных каналов размером от 5 до 60 мм.

Экспериментально определены коэффициенты снижения электрической прочности масляного канала у неэкранированного торца обмотки.

На базе результатов исследований разработаны и внедрены программы расчета изоляции между обмотками.

1.3.5. Изоляция зоны середины и края обмотки снаружи обмотки ВН

В изоляции трансформаторов УВН, как в зоне края обмотки, так и в зоне середины снаружи обмотки, имеют место большие масляные каналы (БМК) размером 60-500 мм. Как показал опыт освоения автотрансформаторов УВН, БМК могут явиться слабым звеном изоляции обмотки ВН.

БМК в зоне середины обмотки испытаны на 21 модели при одноминутном напряжении, 14 — при одночасовом, 10 — при коммутационном импульсе, 21 — при полном грозовом импульсе.

В зоне края обмотки испытано: 21 участок изоляции комплексной модели (верх или низ обмотки) при одноминутном напряжении, 14 — при одночасовом, 20 — при коммутационном импульсе, 15 — при полном грозовом импульсе.

На основе анализа и обобщения результатов исследований комплексных моделей и моделей узлов изоляции снаружи обмотки получены зависимости минимальной пробивной напряженности от размера БМК в диапазоне от 60 до 500 мм при всех видах испытательных напряжений, характерных для трансформаторов УВН. Наличие указанных зависимостей позволяет выполнять расчеты электрической прочности БМК между различными элементами изоляции трансформаторов УВН.

Основным средством повышения электрической прочности изоляции, имеющей большие масляные каналы, является уменьшение размера масляного канала.

1.3.6. Изоляция установки ввода

Одним из наиболее сложных участков изоляции трансформаторов УВН является изоляция установки ввода. Размеры изоляции установки ввода в значительной мере определяют предельную мощность трансформатора.

В изоляции установки ввода можно выделить три наиболее напряженные зоны (рис.8):

- у экрана ввода;
- у фарфора ввода в местах наибольшего приближения заземленных частей;
- у заземленных частей в местах наибольшего приближения к фарфору ввода.

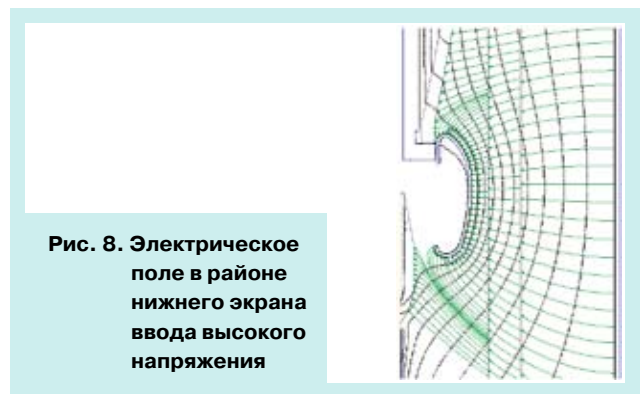


Рис. 8. Электрическое поле в районе нижнего экрана ввода высокого напряжения

Эти зоны воспроизводятся на комплексных моделях и моделях узлов изоляции, выполненных в натуральную величину.

В процессе исследований установлено, что слабым участком изоляции установки ввода может являться как масляный канал у экрана ввода, так и масляные каналы у фарфора ввода в местах наибольшего приближения ввода к заземленным частям.

Электрическое поле у нижнего экрана ввода оказывает значительное влияние на поле внутри самого ввода. Неудачный выбор конфигурации экрана ввода может привести к повреждению внутренней изоляции ввода.

Разработана методика расчета изоляции установки ввода, обеспечивающая получение расчетных коэффициентов запаса электрической прочности всех масляных каналов изоляции при всех видах испытательных напряжений.

1.3.7. Изоляция отводов

Электрическая прочность изоляции линейных отводов обмоток СВН и УВН исследовалась на комплексных моделях и моделях узлов изоляции, выполненных в натуральную величину. В моделях воспроизводились различные параметры отводов, различная изоляция по отношению к обмоткам, плоские, закругленные или острые заземленные части.

Разработан руководящий документ по выбору изоляции отводов силовых трансформаторов классов напряжения 110-750 кВ.

1.4. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В МАСЛОБАРЬЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Частичные разряды в МБИ возникают в масляных каналах и масляных прослойках и характеризуются двумя уровнями.

- Начальные ЧР имеют кажущийся заряд 5-1000 пКл и представляют собой единичные импульсы или группы импульсов, повторяющиеся нерегулярно. Такие ЧР, как правило, не оставляют видимых следов повреждения твердой изоляции при кратковременном воздействии.

- Критические ЧР имеют кажущийся заряд 2500-100000 пКл и более. Такие ЧР вызывают заметные повреждения твердой изоляции даже при кратковременном приложении напряжения.

В маслобарьерной изоляции, как правило, сразу возникают критические ЧР. Пробой масляного канала в МБИ при одноминутном напряжении представляет собой ЧР интенсивностью порядка 10000 пКл и более. Поскольку при таких ЧР возникают необратимые повреждения твердой изоляции в виде черных ветвистых побегов, напряжение пробоя масляного канала принимается за напряжение пробоя МБИ.

Выбор изоляции трансформаторов УВН должен осуществляться на основе минимальных, статистически обоснованных, испытательных и рабочих напряженностей и достаточного расчетного коэффициента запаса. Определение указанных напряженностей выполнено не на основе полного пробоя моделей изоляции, а на основе регистрации скачка ЧР, сопровождающего пробой масляного канала.

По измерениям ЧР в трансформаторах могут быть обнаружены следующие дефекты: воздушные включения, недостаточная сушка, наличие посторонних предметов, плохое качество изоляционных материалов, недостаточная экранировка острых металлических деталей, некачественное наложение изоляции, плохие соединения и др.

Экспериментальные данные, полученные для всех участков изоляции, позволяют разрабатывать изоляцию трансформаторов СВН и УВН, обеспечивающую уровень ЧР при испытании длительным напряжением, не превышающий нормированный.

1.5. ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПАСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ УЧАСТКОВ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Витковая изоляция — программа TURNINS.

Изоляция между катушками — программа COILINS (динамически подключаемая библиотека к программе расчета перенапряжений в обмотках, например, VLN).

Изоляция между обмотками в зоне середины высоты обмотки — программа MIDINS.

Изоляция между обмотками в зоне края обмотки — программа ENDINS.

Изоляция снаружи обмотки в зоне края и середины высоты обмотки — программа ENDINS2.

Изоляция установки ввода — программа BUSHING.

Последние четыре программы представляют динамически подключаемые библиотеки, работающие

совместно с программами расчета электрического поля, например, ELAX-2D.

1.6. ОБЩИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТАМ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

1. Анализ воздействий рабочего и испытательных напряжений на участки главной изоляции обмоток для всех испытательных схем и схем РПН или ПБВ (максимум, минимум, номинал).

2. Предварительный выбор величин главных изоляционных расстояний и параметров продольной изоляции обмоток.

3. Расчеты электрической прочности продольной изоляции обмоток до получения достаточных расчетных коэффициентов запаса при импульсных испытательных напряжениях. Определение импульсных воздействий на главную изоляцию.

4. Расчеты электрической прочности главной изоляции обмоток до получения достаточных расчетных коэффициентов запаса при испытательных напряжениях, определение напряженностей при рабочем напряжении. Оптимизация конструкции изоляции.

5. Выбор изоляции отводов.

6. Расчет электрической прочности изоляции установок вводов.

1.7. ТРЕБОВАНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НИЗКИЙ УРОВЕНЬ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Для обеспечения допустимого по стандартам уровня ЧР разработаны требования к материалам, конструкции, технологии изготовления и проведению испытаний трансформаторов СВН и УВН.

Требования к материалам состоят, в частности, в следующем:

- изоляционные детали обмоток и изоляции установки ввода, а также детали главной изоляции изготавливаются из материалов, свободных от внутренних частичных разрядов после технологической обработки изоляции;

- характеристики трансформаторного масла, используемого в трансформаторе, должны иметь значения не хуже приведенных ниже:

- $U_{\text{проб}}$ — 70 кВ;

- $\text{tg}\delta$ при 90 °С — не более 0,5 %;

- влагосодержание, % массы — 0,001;

- газосодержание, % объема — 0,1;

- механические примеси — количество частиц размером более 5 мкм не должно превышать 2000 штук в объеме 100 мл.

1.8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для проверки надежной работы внутренней изоляции проектируемых трансформаторов в процессе эксплуатации при разработке изоляции выполнялись длительные испытания специальных моделей с заданными высокими напряженностями в масляных каналах у обмоток в зоне середины и края обмотки. Например, при разработке

изоляция повышающего трансформатора 1150 кВ допустимость высоких напряженностей вдоль обмотки ВН и в главной изоляции подтверждена путем длительных испытаний двухстержневой крупномасштабной модели. Для испытаний модели был разработан специальный стенд, оснащенный системами охлаждения и поддержания уровня масла в испытательном баке. Изоляция модели выдержала длительные испытания повышенным рабочим напряжением (110% наибольшего рабочего напряжения) в течение 182 часов.

Исследования в течение 1000 часов и более проведены на моделях участков витковой и главной изоляции с воспроизведением электрического и теплового полей, а также резких изменений температуры. Эти исследования проведены в трансформаторных маслах различных марок.

В течение последних десятилетий спроектированы, изготовлены и находятся в эксплуатации трансформаторы классов напряжения 220, 500, 750 и 1150 кВ, изоляция которых выполнена с целью проверки предельно допустимых значений напряженностей электрического поля в условиях длительной эксплуатации.

Результаты проведенных исследований позволяют принять обоснованные значения рабочих напряженностей в масляных каналах внутренней изоляции трансформаторов УВН.

Допустимая рабочая напряженность для МБИ определяется из условия отсутствия ЧР с кажущимся зарядом более 100 пКл на основе исследования длительной электрической прочности МБИ с учетом электротермоокислительного старения и отсутствия газовыделения в масле. Этим условиям соответствует допустимая средняя напряженность в масляном канале от 3,0 до 5,0 кВ/мм.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВОЗДУШНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Исследования электрической прочности внешней изоляции трансформаторов 330–1150 кВ проведены с использованием двух возбуждаемых моделей класса напряжения 1150 кВ. Использовались промышленные вводы, то есть естественно учитывалось влияние их электрического поля на разрядные напряжения воздушных промежутков. Исследованы изоляционные промежутки от вводов до заземленных частей, расположенных на крышке бака трансформатора, между вводами разных классов напряжения, между вводами разных фаз.

На основе результатов исследований разработан руководящий документ по определению размеров внешней изоляции трансформатора с учетом электрического поля вводов.

Минимальные воздушные промежутки между вводами и от вводов до заземленных частей выбираются по нормированным испытательным напряжениям внешней изоляции: промышленной частоты при плавном подъеме в сухом состоянии, коммутационного и полного грозового импульсов. Выбор воздушных промежутков по нормированным испытательным напряжениям срезанного грозового импульса не требуется.

Для определения конструктивного размера к минимальному воздушному промежутку, определенному по предложенному методу, следует добавить допуск на производственные отклонения.

При выборе минимальных воздушных промежутков по настоящему методу проведение типовых испытаний внешней изоляции трансформатора не требуется [2].

ВЫВОДЫ

1. Результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований ОАО «ВИТ» позволили создать методологию выбора изоляции трансформаторного оборудования УВН переменного тока и на этой основе разработать специальное программно-методическое обеспечение и руководящие документы по расчетам и выбору изоляции.

2. Основные положения методологии

2.1. Основой методологии являются экспериментальные зависимости минимальных пробивных напряженностей масляных каналов различных участков внутренней изоляции трансформаторов УВН при воздействии одночасового и одноминутного напряжений промышленной частоты, напряжений коммутационного и полного грозового импульсов. Минимальные пробивные напряженности соответствуют вероятности пробоя 2-5%.

2.2. Воздействующие напряженности определяются по программе ELAX-2D и сравниваются с минимальными пробивными путем использования динамически подключаемых библиотек (программы ENDINS, MIDINS, ENDINS2, BUSHING).

2.3. Расчеты распределения напряжений в обмотках при импульсных воздействиях выполняются по программе VLN, а коэффициентов запаса — с использованием базы данных программы COILINS.

2.4. Допустимые рабочие напряженности в витковой изоляции и в масляных каналах у обмоток зоны середины и края определяются на основе обширного опыта эксплуатации опытных и промышленных трансформаторов УВН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий З.М., Максимович В.Г., Черноготский В.М., Шифрин Л.Н. Электрическая прочность изоляции обмоточных проводов силовых трансформаторов сверхвысокого напряжения // Электричество. 1974. №2. С.47-52

2. Power transformers. Part 3. «Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air». IEC 60076-3. Second edition. 2000-03

Черноготский Василий Михайлович — начальник лаборатории, старший научный сотрудник Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ОАО «ВИТ»), г. Запорожье (380612) 845245 lit@vit.zp.ua

Джунь Луиза Павловна — старший научный сотрудник ОАО «ВИТ» (380612) 845455 postmaster@vit.zp.ua

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ

Паук Ю.И., Дорогокупля В.А., Желонин В.А.,
Кравченко С.В., Лазарев В.И., *докт. техн. наук*,
Остренко М.В., Тарчуткин А.Л.,
Чорноготский В.М., *канд. техн. наук*

Приведено описание разработанного в ОАО «ВИТ» программного обеспечения для проектирования трансформаторов мощностью 2-1000 МВА и шунтирующих реакторов до 340 МВА, классов напряжения 10-1200 кВ. Структурно-функционально программное обеспечение ВИТ разделено на несколько типов: стандартное программное обеспечение проектирования трансформаторов — SAPR TON; специальное программное обеспечение электромагнитных и механических расчетов; специальное программное обеспечение расчетов изоляции; программное обеспечение проектирования шунтирующих реакторов; программное обеспечение проектирования преобразовательных трансформаторов (трансформаторов постоянного тока).

Ключевые слова: трансформаторы; шунтирующие реакторы; проектирование; программное обеспечение; стандартное программное обеспечение; специальное программное обеспечение

Проектирование конкурентоспособных трансформаторов и электрических реакторов большого диапазона мощностей (2-1000 МВА трансформаторы и до 340 МВА шунтирующие реакторы) классов напряжения 10-1200 кВ требует наличия совершенного и разнопланового программного обеспечения. Это позволяет на стадии разработки получить высокие технико-экономические показатели проектируемых изделий и прогнозируемую надежность в эксплуатации. Стоимость трансформаторов предельной мощности на класс ультравысоких напряжений составляет десятки миллионов долларов, и их повреждение на испытаниях или в эксплуатации создает большие технические и экономические трудности как для производителей, так и для эксплуатации. Программное обеспечение для проектирования таких ответственных объектов должно иметь методическую правильность и достаточную точность, подтвержденную экспериментально на моделях, опытных и серийных образцах. Кроме того, программное обеспечение постоянно совершенствуется с учетом опыта предыдущего проектирования и развития технологий, что позволяет концентрировать накопленные

знания в виде специализированных интерфейсов программ и методов анализа. При этом новые пользователи программ могут воспользоваться опытом, накопленным ранее при использовании программного обеспечения.

В ОАО «ВИТ» для проектирования трансформаторов и реакторов разработано программное обеспечение, которое функционально условно разделено на стандартное и специальное. Разработкой программного обеспечения ВИТ занимается больше 30 лет, и это направление строилось параллельно с освоением новых мощностей и классов напряжений в стране (СССР). Программное обеспечение прошло экспериментальную проверку на большом количестве моделей, опытных и серийных образцах во многих трансформаторных компаниях.

Программное обеспечение ОАО «ВИТ» поставлено во многие трансформаторные компании (более 20 компаний), в том числе: SIEMENS (Германия), Hyundai (Республика Корея), LSIS (Республика Корея), ILJIN (Республика Корея), TBEA (Китай), CGL (Индия), EMCO (Индия), Vijai (Индия), Transformer & Rectifier (Индия), Hyosung (Республика Корея), Iran Transfo (Иран), Wilson (Австралия), Ampcontrol Transformer (Австралия), PTC (США), Zanwa (Малайзия), Енерго (Израиль), Электрозавод (Россия), Тольяттинский трансформаторный завод (Россия), «Энергомаш (ЮК) Лимитед» (Россия), «Росэнерготранс» (Россия), ЗТЗ (Украина) и другие.

Структурно-функционально программное обеспечение ВИТ разделено на несколько типов:

1. Стандартное программное обеспечение проектирования трансформаторов — SAPR TON.
2. Специальное программное обеспечение электромагнитных и механических расчетов — ELMAG SP (electromagnetic specific software).
3. Специальное программное обеспечение расчетов изоляции — INS SP (insulation specific software).
4. Программное обеспечение проектирования шунтирующих реакторов — SRD (shunt reactor design).
5. Программное обеспечение проектирования преобразовательных трансформаторов (трансформаторов постоянного тока) — DCD (direct current design).

1. Стандартное программное обеспечение — система автоматизированного проектирования трансформаторов SAPR TON

Система предназначена для выполнения проектных исследований, оптимизации конструктивных решений и основных размеров, определения технических и экономических характеристик масляных силовых трансформаторов и автотрансформаторов общего и специального назначений в диапазоне напряжений 10-1200 кВ, мощностей от 2 МВА и выше. Система может быть использована также для расчета переходных и установившихся токов и напряжений в электрических сетях с трансформаторами в нормальных и аварийных режимах.

В состав системы входят около 20 прикладных программ моделирования электромагнитных, высоковольтных, тепловых и механических процессов в трансформаторах, реализующих нормативно-техническую базу расчетного проектирования трансформаторов (табл. 1). Все программы используют единые входные данные и централизованную базу данных, через которую реализуются информационные связи между отдельными программами. В системе предусмотрен контроль входных данных, в том числе — графический, и обширная система help-информации. Для некоторых групп данных предусмотрен автоматизированный или графический ввод.

Программы могут функционировать как в комплексном режиме (полный набор или выбранные группы программ), так и в автономном (без связи с другими программами системы).

1.01 PRT — предназначена для выполнения проектных оптимизационных расчетов силовых трансформаторов на стадиях тендерных предложений и заказов для выбора оптимального варианта трансформатора и определения основных размеров магнитной системы и обмоток, а также весовых,

энергетических и экономических характеристик по заданному конструктивной схеме, электрическим параметрам концентров, размерам изоляционных промежутков, напряжению к.з. базовой пары обмоток, удельным электромагнитным нагрузкам.

1.02 TOK — предназначена для определения токов и напряжений ветвей обмоток трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов в сложных многообмоточных, многопараллельных или последовательно-параллельных схемах в установившихся режимах работы. Кроме того, определяются индуктивности и реактансы ветвей, результирующие входные токи, входные импедансы, потребляемые мощности. В качестве расчетной ветви, в зависимости от целей расчета, могут быть приняты: обмотка, концентр, часть концентрира, катушка, параллельный провод винтового концентрира, виток или часть витка.

1.03 OST — предназначена для выбора оптимального расположения мест выполнения перекладок проводов в винтовых обмотках трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов при заданной схеме транспозиций. Оптимальное решение определяется путем минимизации величины потерь от циркулирующих токов.

1.10 TRP — предназначена для моделирования переходных режимов работы однофазных, трехфазных трансформаторов и трехфазных групп однофазных трансформаторов с произвольным включением обмоток. Может быть использована для определения токов включения трансформатора с произвольным включением и отключением однофазных и трехфазных источников напряжения, переходных режимов, связанных с включением и отключением различных типов нагрузок, в частности, короткого замыкания, конденсаторных батарей и пр.

1.11 VLN — предназначена для определения импульсных напряжений между любыми точками винтовых (в том числе многоходовых регулировочных),

Таблица 1

Состав пакета программ SAPR TON

№	Наименование	Функциональное назначение
1.01	PRT	Проектный синтез конструкции трансформатора
1.02	TOK	Расчет распределения токов в обмотках при коротком замыкании
1.03	OST	Оптимизация мест выполнения транспозиции в винтовых обмотках
1.04	MPO	Расчет магнитного поля в обмотках
1.05	PBT	Расчет потерь в обмотках
1.06	POB	Расчет основных и добавочных потерь в обмотках
1.07	RKZ	Расчет сопротивления короткого замыкания пар обмоток
1.08	PIO	Расчет потерь и тока холостого хода
1.09	PRM	Расчет распределения основного магнитного потока по пакетам магнитопровода
1.10	TRP	Расчет переходных процессов в трансформаторе
1.11	VLN	Расчет импульсных перенапряжений
1.12	COILINS	База данных допустимых импульсных воздействий на межкатушечную изоляцию
1.13	TPO	Тепловой расчет обмоток с системами охлаждения ONAN, ONAF, OFAF, OFWF, ODWF, ODAF
1.14	TPM	Тепловой расчет систем охлаждения ONAN, ONAF
1.15	TPL	Тепловой и гидравлический расчет систем охлаждения OFAF, OFWF
1.16	HDR	Гидравлический расчет внутренних и внешних масляных контуров в системах охлаждения ODAF, ODWF
1.17	TRM	Тепловой расчет магнитопровода
1.18	TEO	Тепловой расчет отводов
1.19	PGR	Расчет допустимых систематических и аварийных перегрузок

многослойных и катушечных (непрерывных, непрерывных с холостыми витками различных схем, переплетенных и комбинированных) обмоток с учетом (при необходимости) внешних активных сопротивлений или подключенной сети при полном, срезанном, «фронте волны», прямоугольном или коммутационном воздействующих импульсах с заданными параметрами, а также при импульсах произвольной формы, задаваемых как сумма аналитических функций или таблично. В качестве расчетного элемента, в зависимости от конструкции обмоток, может быть принята группа катушек, отдельная катушка или виток катушки (для расчета внутрикатушечных колебаний). Кроме того, программа позволяет выполнить расчет частотных характеристик трансформатора (FRA).

В качестве примера приводятся расчетные графики и осциллограммы результатов расчета ряда программ пакета SAPR TON.

- Программа MPO — расчет магнитного поля в обмотках (рис. 1.1).
- Программа POB — расчет основных и добавочных потерь в обмотках (рис. 1.2).
- Программа PRM — расчет распределения основного магнитного потока по пакетам магнитопровода (рис. 1.3).
- Программа — VLN расчет импульсных перенапряжений (рис. 1.4).
- Программа TPO — тепловой расчет обмоток с системами охлаждения ONAN, ONAF, OFAF, OFWF, ODWF, ODAF (рис. 1.5).

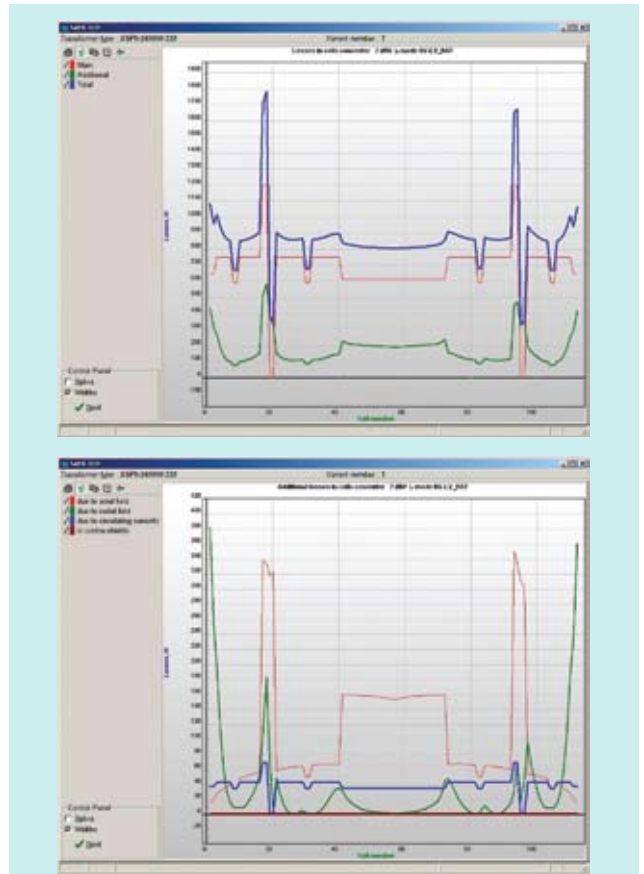


Рис. 1.2

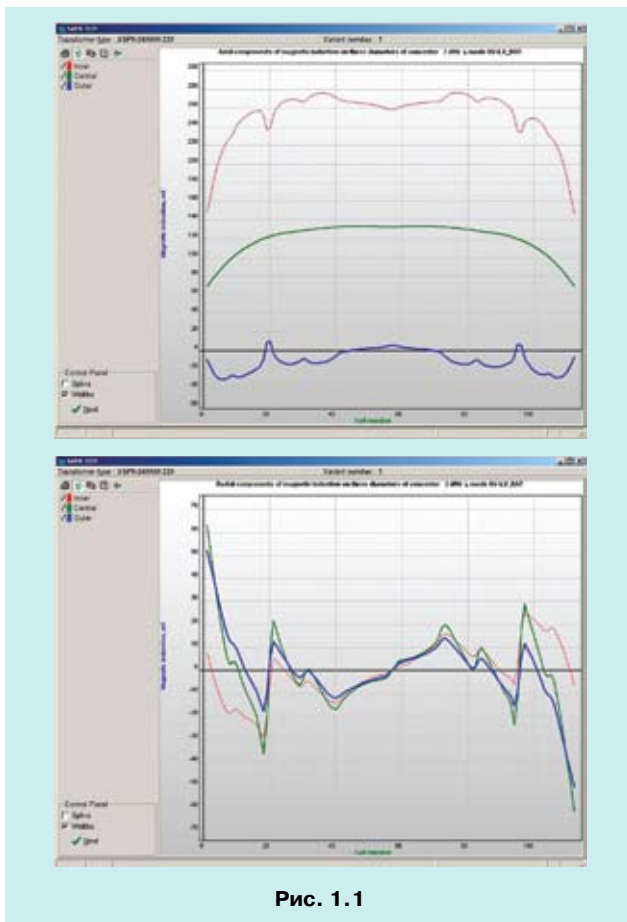


Рис. 1.1

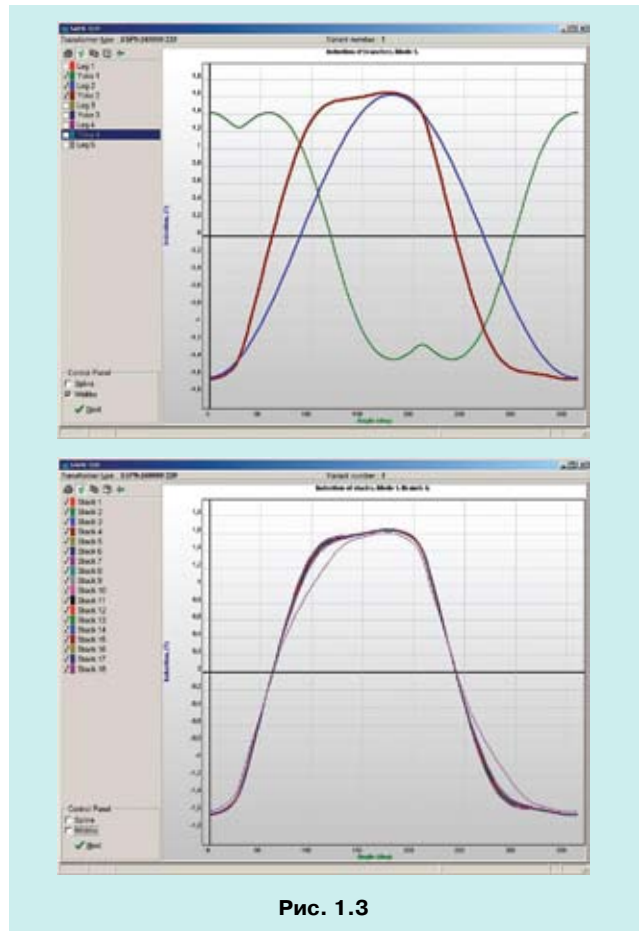


Рис. 1.3

2. Специальное программное обеспечение электромагнитных и механических расчетов трансформаторов ELMAG SP

Программы пакета ELMAG SP в основном применяются на этапе поверочных расчетов типовых конструкций трансформаторов (табл. 2). Пакет программ не имеет общего интерфейса, поскольку исходные данные программ расчета, где решаются задачи теории поля (магнитное, электрическое, механическое), не поддаются 100-процентной формализации.

2.01 ELDINST — предназначена для проверки механической прочности, жесткости и устойчивости обмоток трансформаторов при коротких замыканиях.

В программе выполняются:

- расчет плоского двумерного магнитного поля в области обмоток;
- расчет электродинамической стойкости обмоток при действии радиальных электромагнитных сил;
- расчет прочности проводников при изгибе осевыми и радиальными электромагнитными силами;
- расчет критических сил полегания проводников обмоток;
- расчет коэффициентов жесткости обмоток при осевых деформациях;
- расчет коэффициентов жесткости прессующей конструкции и приведенных масс ярмовых балок;
- расчет электродинамической стойкости обмоток при осевых колебаниях, обусловленных действием осевых электромагнитных сил.

Так же рассчитываются осевые перемещения и силы, действующие на катушки концентроров при коротком замыкании, и силы, действующие на верхнюю и нижнюю прессующие конструкции.

На рис. 2.1 показан пример расчета колебаний одной из катушек двухобмоточного трансформатора 667000 MVA 500kV.

При разработке методики расчета электродинамической стойкости трансформаторов были проведены эксперименты на 200 моделях обмоток на стенде электродинамических испытаний ВИТ.

Результаты расчета по программе подтверждены более чем на 25 трансформаторах, прошедших испытания в СССР. За последние 5 лет 16 трансформаторов, рассчитанных по программе ELDINST, прошли испытания на стендах KEMA (Голландия), Республики



Рис. 1.4

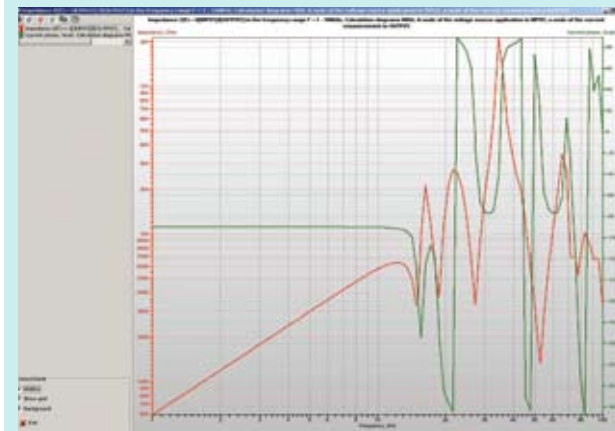
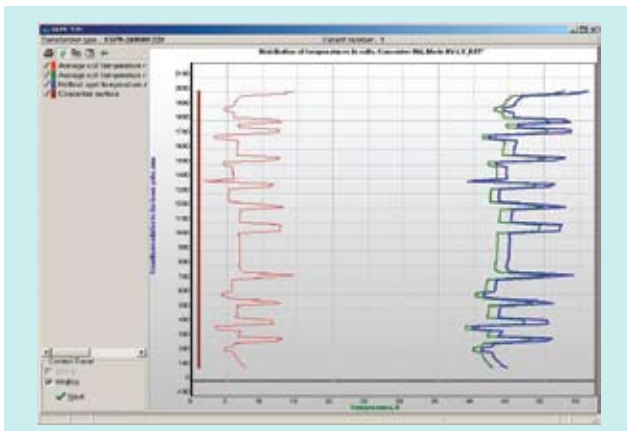


Рис. 1.5



Состав пакета программ ELMAG SP

Таблица 2

№	Наименование	Функциональное назначение
2.01	ELDINST	Расчет электродинамической стойкости обмоток трансформаторов при коротких замыканиях
2.02	EDMAG-3D v2	Расчет трехмерного магнитного поля, добавочных потерь и температур наиболее нагретых точек в элементах конструкции трансформатора
2.03	HLEAD-2D v2	Расчет плоских и осесимметричных магнитных полей постоянных и синусоидальных токов и полей температур
2.04	HARMONICS	Расчет гармонического состава тока холостого хода трансформатора
2.05	SOUND	Расчет уровня звука трансформатора
2.06	INRUSH	Расчет тока включения трансформатора
2.07	Z0	Расчет сопротивлений нулевой последовательности трансформатора
2.08	PTAN	Программно-методическое обеспечение для расчетов баков трансформаторов, ярмовых балок и прессующих колец на механическую прочность в среде ANSYS

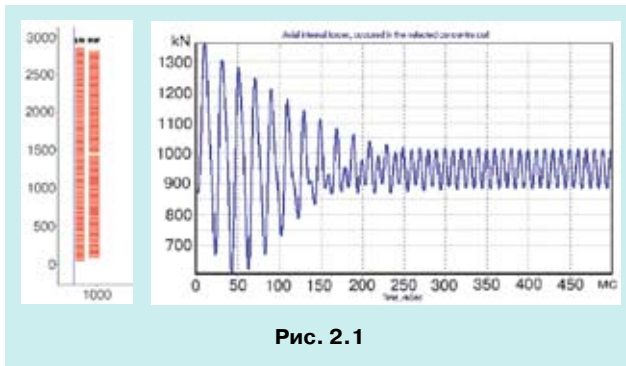


Рис. 2.1

Корея, Китая, Индии, где эксперименты подтвердили расчеты.

2.02 EDMAG-3D v2 — предназначена для расчетов трехмерных магнитных полей, добавочных потерь в элементах конструкции и температур наиболее нагретых точек в элементах конструкции.

Математическая модель программы реализована методом интегральных уравнений (МИУ) и методом конечных элементов (МКЭ) в трехмерной системе координат. Используя преимущества МИУ, можно снизить порядок системы уравнений для расчета граничных условий для МКЭ. Далее МКЭ непосредственно выполняется расчет распределения вихревых токов и поля температур в отдельно выделенном элементе конструкции.

В программе выполняются:

- расчет трехмерного квазистатического магнитного поля с представлением эюр (графиков) поля на элементах конструкций трансформатора (прессующих колец, ярмовой балки, прессующей пластины, поверхности бака);
- расчет потерь и температуры наиболее нагретой точки в прессующем кольце, ярмовой балке, прессующей пластине, выполненных из магнитной и немагнитной сталей;
- расчет потерь в электрических экранах, выполненных из меди или алюминия;
- расчет потерь в баке трансформатора, выполненного из магнитной конструкционной стали.

На рис. 2.2 приведена расчетная модель однофазного автотрансформатора для расчета трехмерного магнитного поля в области магнитопровода и эюра нормальной составляющей индукции поля на поверхности прессующей пластины основного стержня.

2.03 HLEAD-2D v2 — предназначена для расчетов двумерных магнитных полей, добавочных потерь и нагревов участков бака от сильноточных отводов.

Математическая модель программы реализуется классическим методом конечных элементов в двумерной системе координат. Используется генератор сетки собственной разработки. Программа включает возможность автоматического создания конечно-элементных моделей для стандартных случаев моделирования полей: прохождения отводов вблизи металлических частей элементов конструкции и бака, различные расположения отводов сильноточных

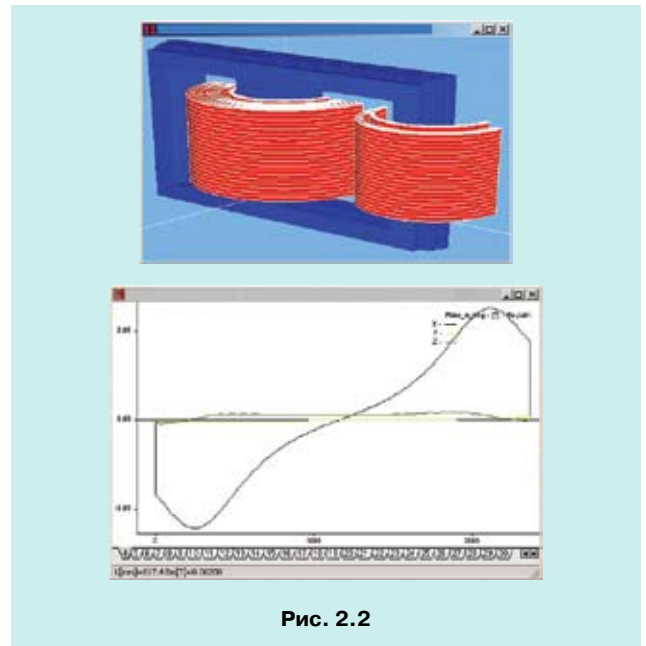


Рис. 2.2

отводов внутри коробок НН и другие случаи, что существенно сокращает время на выполнение расчета и анализ результатов.

В программе выполняются:

- расчет индукции и напряженности магнитного поля в каждой точке расчетной модели, построение силовых линий и картины поля;
- расчет плотности вихревого тока в каждой точке проводящих тел, построение картины поля тока;
- расчет добавочных потерь в выбранном элементе конструкции;
- расчет температуры (превышения температур), обусловленной добавочными потерями, в каждой точке теплопроводящих тел, построение картины температурного поля;
- расчет средней и максимальной температуры в выбранном элементе конструкции.

На рис. 2.3 приведен пример расчета распределения магнитного поля и картины поля превышения температур в коробке для сильноточных отводов.

2.04 HARMONICS — предназначена для расчета гармонического состава линейных токов холостого хода трансформатора.

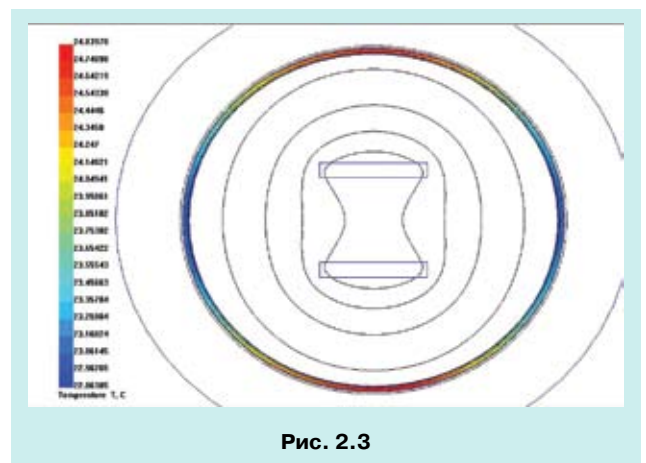


Рис. 2.3

Математическая модель программы построена на основе решения взаимосвязанных электрических и магнитных цепей. Расчетные модели позволяют собирать любую электрическую схему на испытаниях при измерении гармоник, магнитопровод моделируется с учетом петли гистерезиса.

Электрическая цепь включает: обмотки трансформатора, элементы испытательной схемы (генератор, промежуточный трансформатор), прочие элементы схемы замещения трансформатора (емкость ввода, емкость обмоток).

Магнитная цепь включает: нелинейные магнитные сопротивления участков магнитопровода (стержней, ярм, зон стыков) и элементы, моделирующие петли гистерезиса.

Результатами расчета являются осциллограммы токов и напряжений обмоток и гармонический состав токов. На рис. 2.4 приведены графики токов холостого хода и их гармонический состав экспериментальной модели трехфазного двухобмоточного трансформатора.

2.05 SOUND — предназначена для расчета уровня звука силовых трансформаторов. Выполняется расчет уровней звукового давления и силы звука (мощности):

- при выключенной системе охлаждения;
- при включенной системе охлаждения, состоящей из навесных радиаторов с вентиляторами;
- при включенной системе охлаждения, состоящей из навесных радиаторов с вентиляторами и масляными насосами.

В основу метода расчета заложена следующая формула

$$L_{p03(A)} = A \cdot V_L + B \cdot 10 \lg M + K + \sum \Delta L_i,$$

где A, B — эмпирические коэффициенты;

V_L — магнитная индукция в стержне магнитопровода;

M — масса электротехнической стали магнитопровода;

K — поправочный коэффициент;

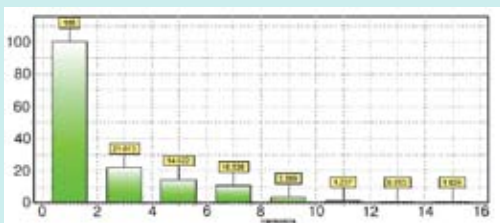
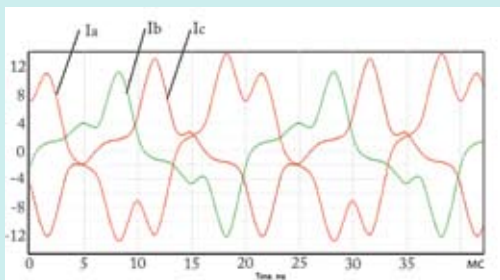


Рис. 2.4

$\sum \Delta L_i$ — сумма поправок к расчету, учитывающих влияние различных конструктивных и технологических факторов (всего учитывается 10 факторов).

Результатами расчета программы являются значения уровня звукового давления и уровня звуковой мощности при вкл./выкл. системе охлаждения.

2.06 INRUSH — предназначена для расчета тока включения на холостой ход однофазных, трехфазных трансформаторов и трехфазных трансформаторных групп. Математическая модель программы построена на основе решения взаимосвязанных электрических и магнитных цепей. Результатами расчета являются:

- наибольшие значения напряжений и токов включения в обмотках трансформатора;
- графики изменения амплитуды токов и напряжений на всем временном интервале (не более 150 с) переходного процесса;
- время достижения током 50% первоначального наибольшего значения $T_{0,5}$;
- время достижения током 5% первоначального наибольшего значения $T_{0,05}$.

На рис. 2.5 приведен пример расчета тока включения двухобмоточного трансформатора.

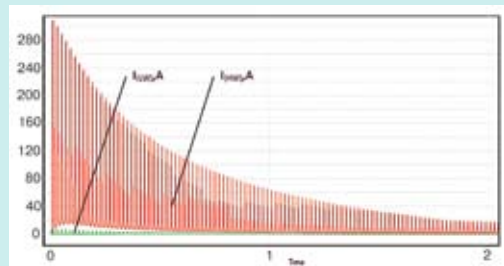


Рис. 2.5

2.07 Z0 — предназначена для расчета сопротивлений нулевой последовательности короткого замыкания и холостого хода трехфазных трансформаторов.

Расчет сопротивлений нулевой последовательности проводится с учетом влияния бака трансформатора, наличия ферромагнитных шунтов на стенке бака и токоограничивающих реакторов, установленных в фазы и в нейтраль трансформатора. Программа позволяет рассчитать сопротивление нулевой последовательности для различных вариантов сторон питания, включенных по схеме Yn или Zn и комбинаций схем соединения вторичных обмоток Y, Yn, D, Zn, Z.

Результатами расчета программы является сводная таблица величин сопротивления нулевой последовательности для различных комбинаций сторон питания, включенных по схеме Yn или Zn.

2.08 PTAN — программа является оболочкой над программой ANSYS в виде макрокоманд и выполняет функцию методического управления программным комплексом ANSYS в решении задач механической прочности трансформаторов и реакторов.

Программное обеспечение предназначено для расчета баков трансформаторов, ярмовых балок и прессующих колец на механическую прочность.

Для прочностного анализа используется ANSYS Structural из семейства программ ANSYS.

Программа PTAN разработана на основе языка ANSYS APDL.

Эта программа состоит из нескольких независимых пакетов, выполняющих следующие функции.

1. Расчет бака трансформатора на механическую прочность и устойчивость.
2. Расчет ярмовых балок на механическую прочность.
3. Расчет прессующих колец на механическую прочность.
4. Расчет трансформатора на сейсмостойкость.

Типовые элементы конструкции бака описаны параметрическим языком программирования (APDL — ANSYS Parametric Design Language). Выбраны типовые формы поперечных сечений баков, типовые формы поперечных сечений ребер жесткости, типовые формы кожухов вводов и т.д. Эти типовые формы представлены в графической форме, которые визуализируются в среде программы ANSYS.

Макрокоманды PTAN представляют собой набор программ, организованных определенным образом в специальную панель инструментов (ANSYS Toolbar). Некоторые макрокоманды работают совместно с *.db файлами, которые содержат специальную графическую информацию для работы макрокоманд.

Макрокоманды выполняют следующие функции.

- Ввод параметров и всех данных, необходимых для расчета. Ввод параметров осуществляется набором меню, сгруппированных по конструктивным признакам геометрических данных. Имена параметров с данными хранятся в памяти для последующей работы.
- Построение геометрической модели на основе введенных параметров на предыдущем шаге. Правильность построенной модели контролируется визуально на экране графического окна.
- Построение сетки конечных элементов. Назначение типов конечных элементов, типов констант и типов материала. При помощи меню можно задать густоту сетки конечных элементов. Элементы генерируются на геометрической модели. Задание граничных условий.
- Задание режима нагрузки. Вычисление нагрузок и приложение в заданных местах.
- Задание типа анализа. Решение задачи.
- Вывод эквивалентных напряжений и деформаций.

Таким образом макрокоманды выполняют полный цикл расчета, начиная с ввода информации, построения расчетной схемы, расчета и вывода результатов расчета.

3. Специальное программное обеспечение расчета изоляции INS SP

Программы предназначены для расчета внутренней изоляции трансформаторов и реакторов. Выполняются расчеты коэффициентов запаса электрической прочности главной и межвитковой изоляции при воздействии срезанного и полного грозовых импульсов, коммутационного импульса, одноминутного, одночасового переменного напряжений, а также длительного рабочего напряжения (табл. 3).

3.01 ELAX-2D v2 — предназначена для расчетов главной изоляции трансформаторов и реакторов.

Последняя версия программы реализует совмещенный метод интегральных уравнений (МИУ) и конечных элементов (МКЭ) второго порядка. Совместное применение МИУ и МКЭ позволяет использовать преимущества обоих методов: повышенную скорость расчетов, возможность задания открытых границ, более высокую точность расчетов при меньших затратах ресурсов компьютера. Программа реализует графический интерфейс ввода/вывода с возможностью импортирования геометрии моделей из CAD систем через файлы DXF формата. Интерфейс программы, включая постпроцессор, адаптирован для расчетов изоляции трансформаторов, что позволяет существенно сократить время анализа результатов по сравнению с программами расчета полей общего назначения.

Интерфейс программы позволяет подключать базы данных, функционирующих как DLL программы (MIDINS, ENDINS, ENDINS2, BUSHING) с прочностными характеристиками изоляции (минимальные пробивные напряженности) и рассчитывать коэффициенты запаса электрической прочности в различных промежутках активной части трансформатора и реактора.

На рис. 3.1 приведен пример графического изображения картины электрического поля (силовые линии и эквипотенциали) расчетного примера у края обмоток автотрансформатора.

Таблица 3

Состав пакета специальных программ INS SP

№	Наименование	Функциональное назначение
3.01	ELAX-2D v2	Расчет плоского и осесимметричного электрического поля
3.02	DLL * ENDINS	Расчет коэффициентов запаса электрической прочности изоляции между обмотками в области краев обмотки
3.03	DLL * ENDINS2	Расчет коэффициентов запаса электрической прочности изоляции снаружи обмоток на краю и в середине их высоты
3.04	DLL * MIDINS	Расчет коэффициентов запаса электрической прочности изоляции между обмотками в середине их
3.05	DLL * BUSHING	Расчет коэффициентов запаса электрической прочности изоляции в области установки
3.06	TURNINS	Расчет коэффициента запаса электрической прочности витковой изоляции

* DLL программы, автоматически работающие с программой ELAX-2D v2.

Программы ELAX-2D v2 и TURNINS работают автономно.

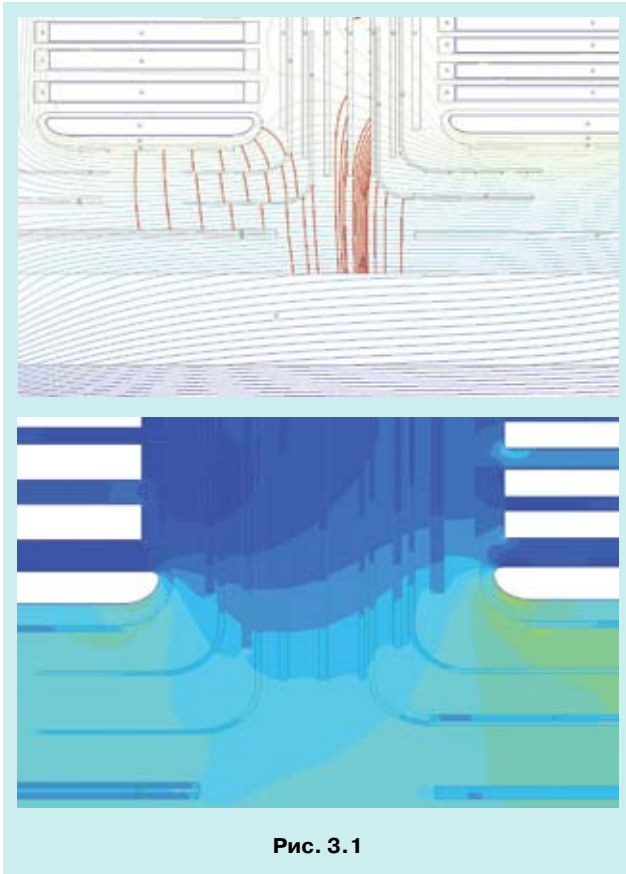


Рис. 3.1

3.06 TURNINS — предназначена для расчета электрической прочности витковой изоляции.

Это автономная программа, позволяющая рассчитать коэффициенты запаса электрической прочности межвитковой изоляции при воздействии срезанного и полного грозовых импульсов, коммутационного импульса, одноминутного, одночасового переменного напряжений, а

также длительного рабочего напряжения. Программа позволяет рассчитать коэффициенты запаса электрической прочности межвитковой изоляции переплетенных обмоток с различными схемами переплетения, непрерывных обмоток, непрерывных обмоток с холостыми витками.

4. Программное обеспечение проектирования шунтирующих реакторов SRD

Данный пакет напрямую рассчитывает наиболее распространенную конструкцию шунтирующего реактора — один стержень и два боковых ярма. Для расчетов трехфазного реактора составляется модельная задача из одного стержня.

Пакет программ SRD состоит из программы оптимизационных расчетов RDO, блока программ поверочных расчетов RVC (reactor verification calculation) и программы механических расчетов RMC, объединенных общим интерфейсом (табл. 4).

4.01 RDO (Reactor Design Optimal) — выполняет оптимизацию размеров и предварительный расчет параметров реактора. Расчеты выполняются по упрощенным, но достаточно точным для данной задачи аналитическим зависимостям с переборкой большого количества вариантов.

В программе выполняются:

- расчет оптимальных размеров диаметра стержня, высоты окна магнитопровода, числа витков, суммарного зазора стержня;
- предварительные расчеты индуктивности, индукции в магнитопроводе, потерь в магнитопроводе, потерь в обмотках, добавочных потерь в элементах конструкции и баке, нагрева обмоток.

4.02-4.13 RVC (Reactor Verification Calculation) — выполняет поверочные расчеты реактора выбранного варианта с использованием полевых программ.

Состав пакета программ SRD

Таблица 4

№	Наименование	Функциональное назначение
4.01	RDO	Оптимизация размеров реактора и предварительный расчет электромагнитных и конструктивных характеристик
	RVC	Блок программ поверочных расчетов
4.02	RMC2D	Программа расчета двухмерных магнитных полей реактора в области обмоток, магнитопровода и элементов конструкций
4.03	RMC3D	Программа расчета трехмерных магнитных полей реактора
4.04	RUC2D	Программа расчета двухмерных температурных полей внутри магнитопровода (превышение температуры над температурой окружающей среды)
4.05	RSLC	Программа расчета добавочных потерь и температур наиболее нагретых точек в элементах конструкции и баке
4.06	RLC	Программа расчета потерь в обмотках и стали магнитопровода
4.07	RTPO	Тепловой расчет обмоток с системами охлаждения ONAN, ONAF, OFAF, OFWF
4.08	RTPM	Тепловой расчет систем охлаждения ONAN и ONAF
4.09	RTPL	Тепловой и гидравлический расчет систем охлаждения OFAF и OFWF
4.10	RTEO	Тепловой расчет отводов
4.11	RINRUSH	Расчет тока включения реактора
4.12	RSOUND	Расчет уровня звука реактора
4.13	RHARM	Расчет гармонического состава тока реактора
4.14	RMC	Проверка прочности механической системы реактора с учетом изменения температуры в процессе изготовления, транспортировки и эксплуатации
4.15	RCM	Программа ввода-вывода данных и управления процессом расчета
4.16	VBR	Набор макрокоманд для расчетов в среде ANSYS вибраций активной части и бака

- В программе выполняются уточненные
- расчет магнитного поля в области магнитопровода, обмоток, элементов конструкции, бака;
 - расчет индуктивности по магнитному полю;
 - расчет кривой насыщения;
 - расчет гармонического состава тока;
 - расчет тока включения;
 - расчет потерь в обмотках основных и добавочных по магнитному полю;
 - расчет добавочных потерь в элементах конструкции и баке;
 - расчет нагрева обмоток;
 - расчет систем охлаждения ONAN, ONAF, OFAF, OFWF;
 - тепловой расчет отводов;
 - расчет потерь в магнитопроводе;
 - расчет уровня звука.

На рис. 4.1 приведена картина магнитного поля в области стержня магнитопровода и обмотки расчетной модели шунтирующего реактора.

4.14 Программа RMC (Reactor Mechanical Calculation) выполняет расчет механической системы активной части реактора:

- выполняется проверка прочности механической системы (магнитопровод, обмотки, конструкция для опрессовки магнитопровода и обмотки) реактора

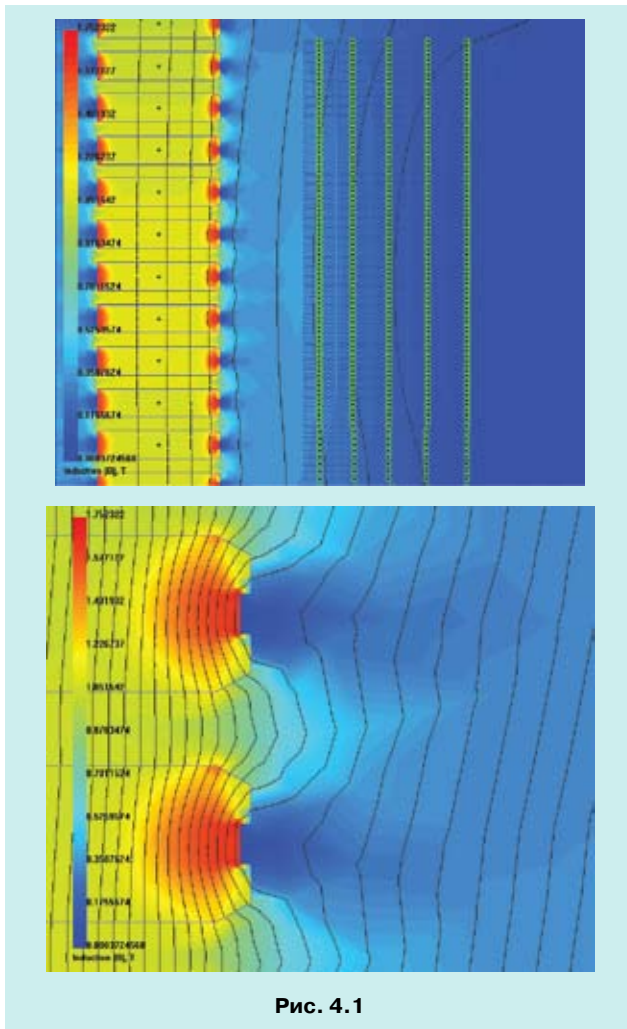


Рис. 4.1

с учетом изменения температуры в процессе изготовления, транспортировки и эксплуатации;

- определяются критические силы полегания проводников обмотки; силы осевой прессовки стержня магнитной системы и обмотки; осевые усилия и механические напряжения в элементах стержня магнитной системы, обмотки и в вертикальных шпильках.

Полученные значения осевых усилий и механических напряжений сравниваются с предельно допустимыми или критическими значениями и рассчитываются соответствующие коэффициенты запаса.

4.15 Стандартное приложение WINDOWS.

4.16 Программа является оболочкой над программой ANSYS в виде макрокоманд и выполняет функцию методического управления программным комплексом аналогично программе PTAN.

Программное обеспечение предназначено для расчета виброперемещений частей бака и элементов активных частей реакторов с последующей оценкой механических напряжений в них. Позволяет оценить эффективность различных конструктивных мероприятий по снижению уровней вибраций и звукового давления реактора.

5. Программное обеспечение проектирования преобразовательных трансформаторов (трансформаторов постоянного тока) DCD

Для проектирования преобразовательных трансформаторов (трансформаторов постоянного тока) в части расчетов параметров, вызванных воздействиями переменного синусоидального напряжения, используются перечисленные выше программы из пакетов SAPR TON и специальных программ ELMAG SP, INS SP. В части воздействия постоянного и несинусоидального напряжения используются специальные программы.

5.1 DCI — Программа расчета изоляции трансформаторов постоянного тока. Программа предназначена для расчета плоского или осесимметричного электрического поля в переходном режиме низкой частоты (до 10000 Гц) и может использоваться для расчета электрической прочности изоляции трансформаторов и реакторов при воздействии постоянного напряжения, постоянного напряжения с реверсированием полярности, суммы постоянного и переменного напряжения. Программа учитывает зависимость удельной проводимости изоляционных материалов от напряженности электрического поля. Программа определяет коэффициенты запаса электрической прочности изоляции вдоль силовых линий в масляных каналах, по поверхности твердой изоляции, срез времени и место с минимальным коэффициентом запаса. Для определения коэффициентов запаса электрической прочности вдоль силовых линий программа строит силовые линии в произвольный момент времени и анимацию с изменением картины силовых линий в функции от времени. В качестве результатов расчета программа строит диаграммы потенциала и напряженности вдоль произвольной линии, картины поля потенциалов и напряженностей в произвольный момент времени, а также анимации

с изменением картины поля потенциалов и напряженностей в зависимости от времени.

Ввод исходных данных состоит из ввода геометрической модели, свойств материалов и источников поля. Для ввода геометрической модели программа располагает как набором собственных инструментов, так и возможностью копирования модели из графических систем проектирования через *.dxf формат (рис. 5.1). Свойства материалов включают относительную диэлектрическую проницаемость, электрическую удельную проводимость, зависимую/независимую от напряженности электрического поля. Для ввода зависимости удельная проводимость (сопротивление)/напряженность электрического поля используется кубический сплайн. Источники поля включают сигнал воздействующего напряжения и условие проводника (граничное условие нулевого суммарного заряда). Для ввода сигнала напряжения в программе используется широкий набор функций.

Результаты расчета выводятся в виде

- картины потенциалов электрического поля;
- картины напряженности электрического поля в точке в функции от времени (рис. 5.2);
- картины напряженности электрического поля всего рассчитываемого пространства в выбранный момент времени реверсирования полярности (рис. 5.3);

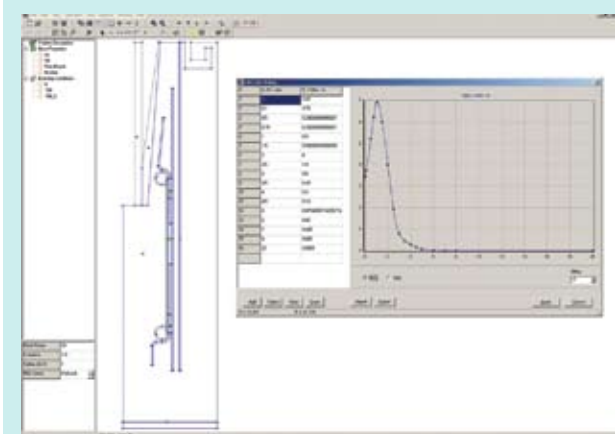


Рис. 5.1



Рис. 5.2

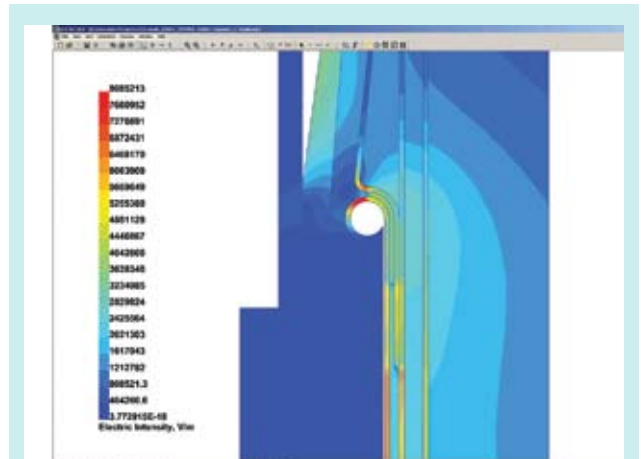


Рис. 5.3

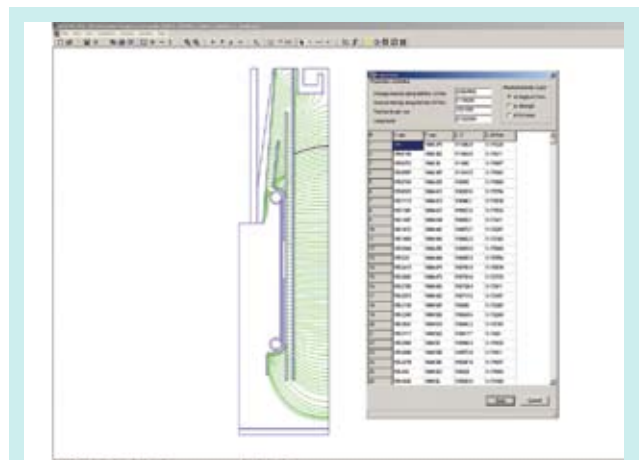


Рис. 5.4

- картины силовых линий электрического поля всего рассчитываемого пространства в выбранный момент времени реверсирования полярности (рис. 5.4);
- значений величин поля вдоль границ геометрической модели, вдоль введенных пользователем линий, в определенных пользователем точках.

Вывод результатов расчета производится в произвольный момент времени. Для картин поля потенциалов, напряженностей и силовых линий создается анимация.

5.2 TRANSCUR — программа расчета несинусоидальных токов в обмотках преобразовательных трансформаторов. Программа предназначена для расчетов формы кривой тока в вентильных и сетевых обмотках преобразовательных трансформаторов с различными схемами выпрямления, в том числе и сложных агрегатных преобразовательных схем выпрямления. Расчетные кривые тока используются для определения гармонического состава токов с целью выполнения последующих расчетов потерь и превышений температур обмоток в программе SAPR TON.

Программа позволяет выполнять расчеты при использовании тиристорных, диодных, диодно-дроссельных схем выпрямления. Примеры расчетных кривых токов приведены на рис. 5.5, индукции в насыщающемся реакторе — на рис. 5.6.

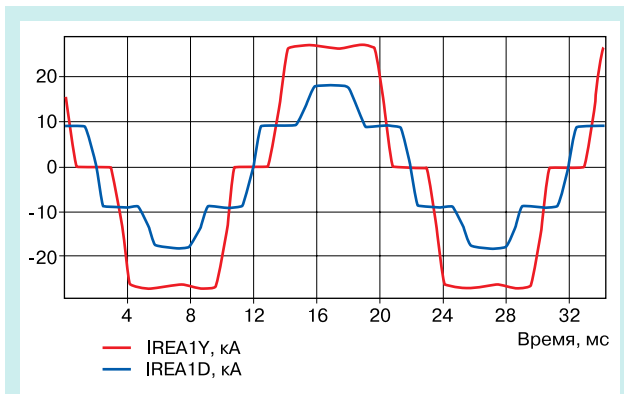


Рис. 5.5. Ток в вентильных обмотках, соединенных в треугольник и звезду, для 12-ти фазного мостового выпрямителя с учетом межмостового циркулирующего тока — мощный выпрямитель для трансформатора с параметрами: выпрямленный ток — 53 кА, напряжение — 950 В

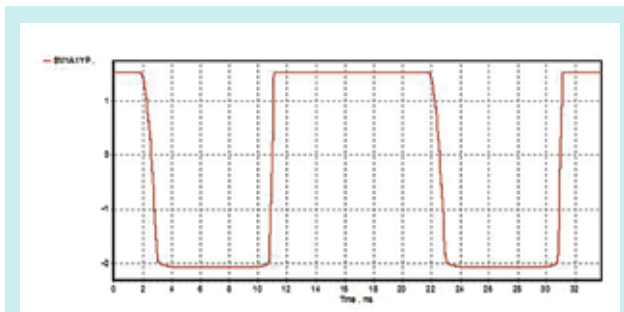


Рис. 5.6. Индукция, Тл, в насыщающемся дросселе в режиме максимума падения напряжения

В заключение следует отметить, что процесс создания программного обеспечения непрерывен, программы постоянно совершенствуются, появляются новые версии. Этот процесс будет продолжаться с развитием трансформаторостроения.

Паук Юрий Иванович — заместитель директора института по научно-исследовательской работе, начальник отдела электромагнитных исследований (38061)2845250 oemi@vit.zp.ua

Дорогокупля Владимир Александрович — главный конструктор САПР (38061)2845262 Volodymyr.Dorogokuplya@vit-lap.com

Желонин Владимир Александрович — старший научный сотрудник (38061)2845255 Volodymyr.Zhelonin@vit-lap.com

Кравченко Светлана Владленовна — ведущий инженер-конструктор (38061)2845246 komto@vit.zp.ua

Лазарев Виктор Иванович — начальник электро-механической лаборатории отдела электромагнитных исследований (38061) 2845173 postmaster@vit.zp.ua

Остренко Максим Владимирович — научный сотрудник (38061) 2845211 oemi@ispvit.zp.ua

Тарчуткин Александр Леонидович — начальник лаборатории (38061) 2845211 oemi@ispvit.zp.ua

Черноготский Василий Михайлович — начальник лаборатории, старший научный сотрудник (38061) 2845245 lit@vit.zp.ua

Все авторы — сотрудники Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ОАО «ВИТ»), г. Запорожье

Подписку на журнал

ЭЛЕКТРО

электротехника, электроэнергетика,
электротехническая промышленность

можно оформить в любом отделении связи. Подписной индекс по каталогу Агентства «РОСПЕЧАТЬ»

80832

Кроме того, подписаться на журнал можно через:

Агентство ООО «Вся пресса»
тел. (495) 234-03-08, 787-34-45

Информационно-рекламную компанию ООО «Интерпочта»
(для жителей Москвы) тел. (495) 921-29-88, 925-22-06, 925-16-06

Подписку с доставкой в регионы России,
а также страны Ближнего и Дальнего зарубежья
можно оформить через:

Агентство ООО «Информнаука» тел. (495) 787-38-73, тел./факс (499) 152-54-81

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ХОЛОСТЫХ ВИТКОВ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

Чорноготский В.М., канд.техн.наук,
Джунь Л.П., канд.техн.наук, Шлыков А.Г.

Улучшение распределения импульсных напряжений в обмотках высокого напряжения зачастую достигается применением холостых витков (не обтекаемых током внутренних экранов). В работе приведены результаты расчета распределения импульсного напряжения в обмотке 500 кВ с холостыми витками и без них. В обмотке с холостыми витками существенно уменьшились импульсные напряжения, воздействующие на межкатушечную изоляцию. Для расчета распределения напряжения вдоль обмотки необходимо как можно точнее учитывать емкости между холостым витком и обтекаемыми током соседними проводниками, определяемые геометрией проводов и их взаимным расположением. Приведенные в работе результаты измерения емкостей на моделях показали заметное снижение измеренной емкости по сравнению с расчетной, что можно объяснить неровностью боковой поверхности провода. В работе приведены результаты испытаний 5-ти вариантов моделей холостых витков с разной конструкцией исполнения изоляции края холостого витка в обмотке высокого напряжения из транспонированного провода. Минимальная напряженность пробоя двух вариантов моделей холостых витков близка к рекомендуемой при расчетах электрической прочности витковой изоляции.

Ключевые слова: обмотки силовых трансформаторов, шунтирующие реакторы, изоляция, холостые витки, емкость, импульсные напряжения, электрическая прочность

Применение в обмотках высокого напряжения холостых витков (не обтекаемых током внутренних экранов) позволяет существенно улучшить распределение импульсных напряжений в обмотках высокого напряжения [1]. Степень улучшения распределения напряжения зависит от параметров обмотки, количества и размеров холостых витков (ХВ), схемы соединения ХВ.

На рис. 1 приведена зависимость импульсного напряжения между соседними катушками (в кВ) обмотки класса напряжения 500 кВ с холостыми витками от номера канала (красная кривая). Из рис. 1 видно, что при воздействии на такую обмотку стандартных

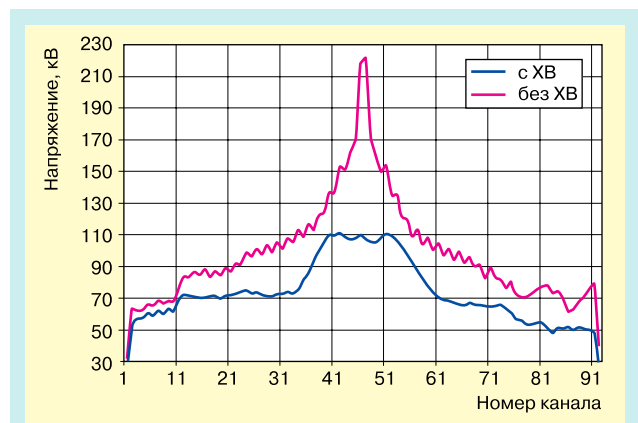


Рис. 1. Влияние холостых витков на напряжения между катушками обмотки 500 кВ

импульсов наибольшее напряжение между катушками равно 110 кВ. Синяя кривая на рис. 1 относится к той же обмотке, но без холостых витков. В этом случае наибольшее напряжение между катушками равно 220 кВ. То есть применение холостых витков всего в нескольких катушках, примыкающих к выводу 500 кВ, позволило уменьшить наибольшее напряжение между катушками в два раза. Анализ рис. 1 показывает, что в обмотке с холостыми витками уменьшились также напряжения между всеми катушками. Приведенные на рис. 1 данные получены расчетом по программе VLN [2], усовершенствованной для обеспечения расчетов импульсных напряжений в обмотках с холостыми витками.

Результаты расчетов по программе VLN распределения импульсных напряжений в обмотках с холостыми витками подтверждены экспериментально путем многочисленных измерений методом низковольтных импульсов.

При расчете распределений напряжения вдоль обмотки с холостыми витками следует как можно более точно учитывать емкости между холостым витком и обтекаемыми током соседними проводниками. Для



Рис. 2. Холостой виток рядом с плоским и транспонированным основным витком

иллюстрации разницы в геометрии на рис. 2 приведены схематически варианты расположения холостого витка (всегда плоского) рядом с плоским и с транспонированным основным проводом.

Естественно предположить, что при прочих равных условиях емкость «холостой виток – основной виток» для основного витка, выполненного транспонированным проводом, будет меньше, чем для основного витка, выполненного прямоугольным проводом.

Для оценки такого коэффициента снижения были изготовлены модели: а) «плоский-плоский» и б) «плоский-транспонированный». Модели были высушены и залиты маслом. Измерения емкостей показали, что для случая «плоский-плоский» отличие измеренной величины межвитковой емкости от рассчитанной по формуле, применяемой в программе VLN, находится в пределах погрешности измерения (1-2%).

Для случая «плоский-транспонированный» измеренная величина межвитковой емкости оказалась на 17% ниже рассчитанной по формуле, применяемой в программе.

Такое снижение можно объяснить неровностью боковой поверхности транспонированного провода. Приведенные результаты учтены в программе VLN.

Воздействия на изоляцию между холостым витком и соседним токоведущим витком значительно больше воздействий между токоведущими витками как при испытании, так и в рабочем режиме в процессе эксплуатации.

Для определения коэффициентов запаса кроме воздействий необходимо знать электрическую прочность изоляции между основными и холостыми витками. По данным, например, [3] или по программе TURNINS можно определить электрическую прочность межвитковой изоляции. Особым местом изоляции XB является изоляция краев (концов провода). Целесообразно изоляцию этого места выбрать так, чтобы его электрическая прочность была близка к электрической прочности остальной части межвитковой изоляции.

Для решения этой задачи были проведены сравнительные исследования импульсной прочности различных вариантов изоляции края XB. Модели воспроизводили конструкцию и размеры изоляции края XB в обмотке высокого напряжения из транспонированного провода.

Конструктивно модель изоляции края XB (рис. 3) представляла собой два отрезка транспонированного провода ПТБУ (2•5,6/1,36)•11 длиной около 1м, связанных плашмя друг с другом на 4/5 длины с помощью банджа из киперной ленты. Свободные концы транспонированных проводов отгибались плавно в раз-



Рис. 3. Модель изоляции края холостого витка

ные стороны. Противоположные концы проводников транспонированных проводов зачищались и припаивались друг к другу и к медному проводу, служащему для заземления модели.

Между двумя транспонированными проводами располагался третий провод марки ПБУ 1,9•10.,0/2,00, воспроизводящий холостой виток в обмотке высокого напряжения. Длина холостого витка примерно 0,8 м. Конец холостого витка, расположенный между транспонированными проводами, изолирован, противоположный конец зачищался для подключения к источнику напряжения.

Комплект моделей в количестве 5 шт. закреплялся на изоляционной раме (рис. 4).



Рис. 4. Модели изоляции края XB в прозрачном испытательном баке

В вариантах моделей 1 и 2 изолировка края холостого витка производилась бумагой Dennison толщиной 0,063 мм и Insulating Crepe Paper толщиной 0,08 мм. Технология изолировки конца XB обеспечивала плотное прилегание изоляции к поверхности проводника. Для склейки полос изоляции применялся клей КМЦ.

Край голого провода холостого витка перед изолировкой округлялся и зачищался.

В варианте модели 3 к концу провода холостого витка примыкала картонная полоса.

В вариантах моделей 4 и 5 для изолировки конца провода XB использовалась собственная витковая изоляция провода и бумага Dennison и Insulating Crepe Paper. Вариант 5 имел увеличенную толщину изоляции вблизи края XB.

Испытания моделей XB проводились в прозрачном баке из оргстекла, заполненном трансформаторным

маслом с характеристиками, удовлетворяющими требованиям к маслу для трансформаторов 220-500 кВ. Сушка и заливка маслом моделей проводилась по типовым технологическим процессам для трансформаторов 220 кВ.

Испытания моделей ХВ в соответствии с требованиями ГОСТ 1516.3-96 проведены полным грозовым импульсом с параметрами: длительность фронта 1,23 мкс, длительность импульса 53 мкс. Методика приложения испытательного напряжения — трехударная ступенчатая. Испытания проводились до появления признаков повреждения или пробоя: изменение формы осциллограмм (рис. 5), звук в баке, выход пузырей на поверхность масла и др. Место пробоя или повреждения устанавливалось при последующей разборке моделей.

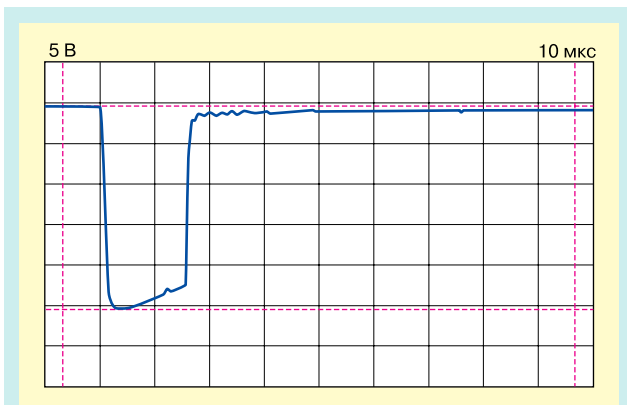


Рис. 5. Осциллограмма напряжения при пробое на 10-й микросекунде

На рис. 6 приведены напряжения пробоя всех пяти вариантов исследованных моделей.

В таблице приведены средние и опытные минимальные пробивные напряженности.

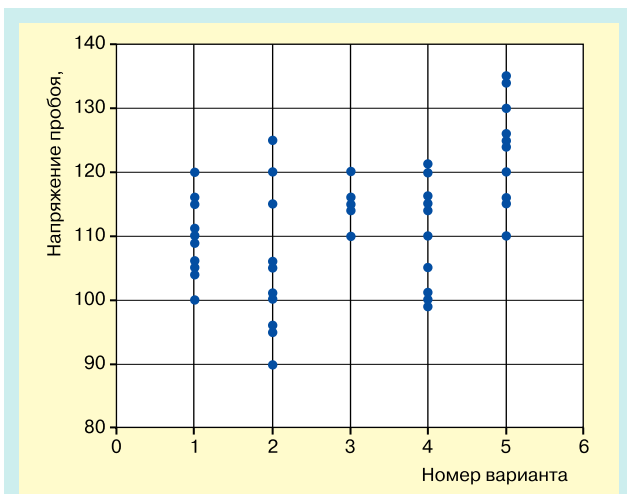


Рис. 6. Распределение напряжений пробоя

Примерно 70% пробоев произошли у края провода ХВ (рис. 7), около 20% — в зоне конуса изоляции ХВ и примерно 10% — в зоне целой витковой изоляции (рис. 8).

Вариант	1	2	3	4	5
Средняя пробивная напряженность, кВ/мм	65	62,5	68,5	65,5	73,5
Минимальная пробивная напряженность, кВ/мм	59,5	53,5	65,5	59,5	65,5

Варианты моделей 3 и 5 имеют наибольшие средние и минимальные напряжения пробоя.

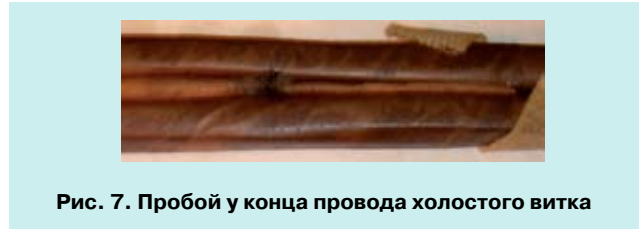


Рис. 7. Пробой у конца провода холостого витка



Рис. 8. Пробой витковой изоляции

Минимальная напряженность пробоя вариантов 3 и 5 близка к рекомендуемой для выбора витковой изоляции. Эти варианты изолировки края холостых витков выбраны для применения в обмотках высокого напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.M. Del Vecchio, B. Poulin, R. Ahuja. «Calculation and measurement of winding disk capacitance with wound-in-shields». IEEE Transactions on Power Delivery, vol.13, № 2, april 1998, p. 503-509.
2. Бунин А.Г., Желонин В.А. Расчет импульсных напряжений в обмотках трансформаторов с учетом нелинейных элементов защиты // Электричество. 1989. № 3. С. 8-15.
3. Белецкий З.М., Максимович В.Г., Черноготский В.М., Шифрин Л.Н. Электрическая прочность изоляции обмоточных проводов силовых трансформаторов сверхвысокого напряжения // Электричество. 1974. № 2. С. 47-52

Черноготский Василий Михайлович — начальник лаборатории, старший научный сотрудник Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ОАО «ВИТ»), г. Запорожье (380612) 845245 lit@vit.zp.ua

Джунь Луиза Павловна — старший научный сотрудник ОАО «ВИТ» (380612) 845455 postmaster@vit.zp.ua

Шлыков Александр Григорьевич — старший научный сотрудник ОАО «ВИТ» (380612) 845455 postmaster@vit.zp.ua

СЕРИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ 110 кВ С РПН

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ

Смагин А.П.

Рассмотрены основные этапы развития серии двух- и трехобмоточных трансформаторов 110 кВ с РПН общего назначения. Приведены данные о технических решениях, основных материалах, комплектующих изделиях и результаты исследований, которые использовались при разработке серий трансформаторов на каждом этапе их развития. Отражены эксплуатационные преимущества разработанных серий, рассмотрены вопросы стойкости трансформаторов к токам к.з. Приведена динамика изменения технических характеристик трансформаторов за рассматриваемый период.

Ключевые слова: серия трансформаторов 110 кВ с РПН; этапы развития; технические характеристики; динамика изменений; трехобмоточные трансформаторы с РПН без ПБВ в обмотке СН; трехобмоточные трансформаторы с РПН со сниженной мощностью обмоток СН и НН; двухобмоточные трансформаторы с ФСО; переключающие устройства типа РНТА

Серии двух- и трехобмоточных трансформаторов 110 кВ с РПН общего назначения, охватывающие мощности 6,3-80 МВА, были и остаются одними из массовых в трансформаторостроении.

Разработанные в послевоенные годы Московским электрозаводом (МЭЗ) трансформаторы различных серий в течение длительного времени изготавливались как на этом заводе, так и на Запорожском трансформаторном (ЗТЗ) без существенного изменения их конструкций и соответствовали требованиям ГОСТ 401-41 «Трансформаторы силовые масляные».

Это были трансформаторы со «шпилечными конструкциями» магнитных систем, выполненными из горячекатаной электротехнической стали. Испытательное напряжение линейного конца обмотки ВН промышленной частоты равнялось 230 кВ действ. Защита обмотки ВН от импульсных перенапряжений осуществлялась, в частности, экранирующими витками. Трансформаторы имели невысокий диапазон регулирования напряжения под нагрузкой, равный $\pm 10\%$ ($\pm 4 \times 2,5\%$). Регулировочные витки располагались непосредственно в обмотке ВН у ее нейтрального конца. Регулирование напряжения осуществлялось с помощью переключающего устройства реакторного типа (РНТ-13).

В течение 1957-1962 гг. проведена частичная модернизация этих серий. На ЗТЗ переработан ряд старых конструкций МЭЗ и созданы более совершенные трансформаторы.

На МЭЗ в это же время разрабатывается и внедряется в производство промежуточная серия, обладающая более высокими техническими характеристиками.

В 1959 г. в Запорожье образован институт трансформаторостроения, в дальнейшем именуемый ВИТ. Основная его задача заключалась в решении вопросов, связанных с созданием нового трансформаторного оборудования и обновлением существующих серий, в том числе трансформаторов 110 кВ с РПН.

При совместном участии ВИТ, ЗТЗ, МЭЗ и Тольяттинского электротехнического завода (ТЭЗ) до 1990 г. создано и внедрено в производство несколько поколений серий трансформаторов 110 кВ с РПН. Некоторые типы трансформаторов изготавливались также на Чирчикском трансформаторном заводе и Уралэлектротяжмаше.

Следует отметить, что работа по созданию серий на всем протяжении носила системный характер и базировалась не только на применении новых материалов и комплектующих изделий, но и на результатах проводимых исследований изоляции, электромагнитных и тепловых вопросов, а также динамической стойкости трансформаторов к токам к.з.

Исследовательские работы проводились в ВИТ и Всесоюзном электротехническом институте им. В.И. Ленина (ВЭИ, г. Москва) с участием заводов-изготовителей трансформаторов.

Рассмотрим основные этапы развития серий трансформаторов 110 кВ с РПН.

1. Разработка и внедрение в производство трансформаторов взамен изготавливаемых по ГОСТ 401-41. Работа была начата в 1964 г. и предусматривала следующее.

- Переход на новую шкалу мощностей, соответствующую международным стандартам.

- Унификацию номинальных напряжений обмотки ВН.

- Снижение испытательного напряжения промышленной частоты линейного конца обмотки ВН до 200 кВ действ. при соответствующем снижении импульсных испытательных напряжений.

- Координацию испытательных напряжений нейтрали обмотки ВН путем увеличения ее испытательного напряжения промышленной частоты до 100 кВ действ. Это мероприятие обуславливалось имевшими место авариями на трансформаторах 110 кВ с РПН, работающих с разземленной нейтралью, по причине выхода из строя разрядников, защищающих эту нейтраль. Аварии происходили при коммутационных перенапряжениях.

– Увеличение диапазона регулирования напряжения под нагрузкой до $\pm 16\%$ ($\pm 9 \times 1,78\%$). Это стало возможным благодаря применению быстродействующих переключающих устройств РПН типа РС с активными токоограничивающими сопротивлениями. Устройства поставлялись по кооперации из Народной Республики Болгарии (НРБ). Принятый диапазон РПН давал более широкие возможности обеспечения потребителей высоким качеством электроэнергии.

– Использование холоднокатаной электротехнической стали с удельными потерями не более 1,11 Вт/кг при индукции 1,5 Тл.

– Исключение отверстий в стержнях и ярмах магнитных систем для их прессовки. Прессовка стержней осуществлялась с помощью стеклобандажей, ярм — стальными полубандажами или металлическими шпильками, проходящими вне активной стали. Шихтовка пластин магнитной системы выполнялась по комбинированной схеме с чередованием прямого и косого стыков в углах.

– Применение алюминиевых обмоточных проводов в двухобмоточных трансформаторах 6,3, 10, 16 МВА и трехобмоточных — 6,3, 10 МВА.

– Прессовка обмоток в активной части с помощью стальных колец и нажимных винтов.

– Выполнение отдельно вынесенного многоходового регулировочного центра РОВН, где каждый ход являлся регулировочной ступенью. Электрическая схема РПН была построена с использованием ступеней грубого и тонкого регулирования напряжения. Регулировочный центр располагался снаружи обмотки ВН.

– Отмену на ЗТЗ и ТЭЗ пропитки обмоток бакелитовым лаком.

– Создание новой конструкции главной и продольной изоляции обмотки ВН, учитывающей снижение испытательного напряжения и наличие регулировочного центра. Разработанная конструкция изоляции была рассчитана на безвакуумную заливку маслом активных частей в баках трансформаторов. Ее особенностью являлось отсутствие экранирующих витков в обмотке ВН.

Обеспечение определенных удобств при монтаже и эксплуатации трансформаторов выражалось в следующем:

а) в транспортировке трансформаторов с маслом, исключаяющей подсушку активных частей при монтаже и вводе трансформаторов в эксплуатацию;

б) в отказе от ревизии активных частей при вводе трансформаторов в эксплуатацию;

в) в применении герметичных масляных вводов на напряжение 110 кВ и съемных вводов на напряжения 6-35 кВ;

г) в применении трансформаторов тока на вводах 110 и 35 кВ;

д) в создании системы газосбора в трансформаторах, обеспечивающей отвод газа к газовому реле из всех возможных мест его скопления;

е) в снабжении всех трансформаторов шкафами для автоматической стабилизации напряжения;

ж) в выполнении баков с разъемом у дна для трансформаторов с массой активной части более 25 т, что

не требовало больших грузоподъемных средств на подстанциях.

Технические требования к разработанным и внедренным в производство на этом этапе сериям нашли свое отражение во вновь созданном стандарте ГОСТ 12965-67 «Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения класса напряжения 110 кВ». С введением в действие этого стандарта завершилась необходимая унификация серий, положившая конец большому разнообразию типов и типоразмеров трансформаторов.

Следует отметить, что разработка трансформаторов выполнялась на основе расчетной оценки их стойкости к токам к.з. Эта оценка носила несовершенный характер. Проведенные испытания некоторых типов трансформаторов (как двух- так и трехобмоточных) в большинстве случаев имели отрицательный результат. Как правило, неустойчивыми оказывались внутренние сжимаемые обмотки и РОВН.

2. Разработка и внедрение в производство модернизированных трансформаторов стойких к токам к.з. Для этой цели при разработке был принят ряд мер, в частности:

– положительное решение совместно с энергетиками вопроса о величине тока к.з. в средней по расположению обмотке трехобмоточных трансформаторов, работающих в трехобмоточном режиме, величина тока к.з. устанавливалась равной 14 крат;

– учет опыта ранее проведенных испытаний на стойкость к токам к.з.;

– уточнение расчетных усилий и напряжений, возникающих в обмотках при к.з., которое проводилось с использованием результатов исследовательских работ, выполненных в ВЭИ, в дальнейшем результаты исследований нашли свое отражение в нормативном документе РТМ 800.428-77 «Трансформаторы силовые. Расчет электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании»;

– применение для дистанцирующих прокладок обмоток электрокартона, предварительно обработанного повышенным давлением (каландрированный электрокартон);

– выполнение обмоток НН (на некоторых трансформаторах и СН) на бакелитовых цилиндрах;

– применение на ряде трансформаторов в сжимаемых обмотках шайб из электрокартона, располагаемых между катушками;

– дополнительное вложение обмоточного провода в обмотки СН и НН за счет его изъятия, в частности, из обмотки ВН.

С учетом принятых мер была обеспечена стойкость трансформаторов к токам к.з.

Одновременно с модернизацией введен в действие ГОСТ 12965-74 (взамен ГОСТ 12965-67), учитывающий проводимую работу и ряд других изменений и дополнений.

3. В начале 70-х годов прошлого столетия в ВИТ проведен комплекс исследовательских работ по созданию конструкций главной и продольной изоляции для вакуумной заливки маслом активных частей в баках трансформаторов. Исследования проводились на специальных моделях. По результатам исследований

разработаны руководящие технические материалы. Однако полученные результаты в новых разработках не были реализованы из-за неготовности заводов-изготовителей к внедрению в производство трансформаторов с вакуумной заливкой маслом.

4. В 1976 г. начаты работы по усовершенствованию трансформаторов, изготавливаемых в соответствии с ГОСТ 12965-74, стойких к токам к.з.

Изначально в ВИТ был разработан, изготовлен и испытан, включая динамику (см. рисунок) опытный образец трансформатора ТДТН-40000/110 — прототип усовершенствованных серий.

Основные технические решения, принятые в опытном образце:

- шихтовка пластин магнитной системы выполнялась по схеме с полным косым стыком на крайних стержнях и комбинированным стыком на среднем стержне;
- выполнение прессующих и опорных колец обмоток из древесно-слоистого пластика (ДСП);
- применение для двух- и трехобмоточных трансформаторов мощностью 25, 40, 63, 80 МВ·А ввода линейного напряжения в середину обмотки ВН. В сочетании с прессующими и опорными кольцами из ДСП это решение упрощало конструкцию ярмовой изоляции;
- выполнение РПН в нейтрали обмотки ВН по схеме «реверс», упрощающего конструкцию регулировочной обмотки;
- применение разработанной в ВИТ усовершенствованной конструкции главной и продольной изоляции. Ее особенность заключалась в отсутствии у линейного конца обмотки ВН дисковых катушек с дополнительной изоляцией. Минимальная величина радиального канала в основной зоне обмотки составляла 3,6 мм;
- по результатам проведенных тепловых исследований в обмотках СН и НН принята минимальная величина радиального охлаждающего канала равная 3,2 мм;

– в трансформаторах 25 МВА и более применение в обмотках ВН подразделенного медного провода;

– в обмотках СН — упрочненного провода, выполненного из сплава меди, что повышало динамическую стойкость обмоток к токам к.з.;

– использование вводов 110 кВ с твердой изоляцией, упрощающее их обслуживание в процессе эксплуатации трансформаторов.

Промышленное производство усовершенствованных серий трансформаторов на разных заводах было начато после 1980 г., а опытно-промышленных образцов отдельных типов — в 1978–1980 гг.

По результатам выполненной работы был введен в действие ГОСТ 12965-85 (взамен ГОСТ 12965-74).

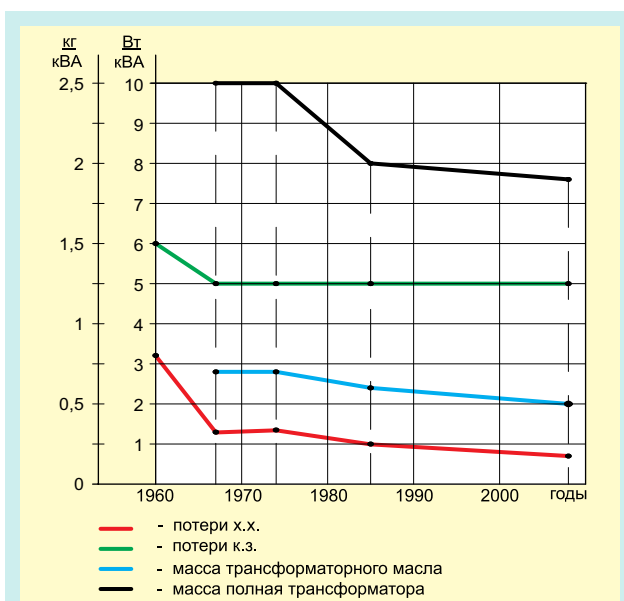
За создание, организацию серийного производства и внедрение в народное хозяйство трансформаторов новой усовершенствованной серии 110 кВ ряду специалистов десяти предприятий и организаций СССР, в их числе ВИТ, ТЭЗ, ЗТЗ, ВЭИ, была присуждена премия Совета Министров СССР за 1986 г. Конкретно в ВИТ ее получили: Мелешко И.Ю., Басс М.А., Смагин А.П., Медовой И.Л., Лимина И.К., Заболотный Н.Л., Козлов В.А.

5. Очередной этап работ по улучшению технических параметров серий трансформаторов был начат в 1986 г. Их цель состояла в выявлении и исследовании технических решений, обеспечивающих высокий технический уровень и существенное снижение материалоемкости изделий.

Исследования проводились на опытном образце трансформатора ТРДН-40000/110, разработанном и изготовленном в ВИТ. Была применена блочная сборка. Блочная сборка обмоток и изоляции осуществлялась вне магнитопровода. Блок обмоток, представляющий собой фазу трансформатора, включал комплект обмоток, главную изоляцию, верхнее и нижнее опорные кольца, изготовленные из древеснослоистого пластика (ДСП). Блок опрессовывался заданным усилием и стягивался в осевом направлении специальными стяжками из изоляционного материала. Были разработаны и исследованы три вида стяжек. В одну из них включены элементы из сплава с «памятью». Предполагалось, что элементы создадут постоянное усилие запрессовки обмоток в процессе эксплуатации трансформатора. Конструкция блочной сборки позволила существенно разгрузить ярмовые балки от усилий запрессовки обмоток и короткого замыкания, выполнить их облегченного типа и:

- применить эмальпровода для обмотки НН;
- объединить функции нижних ярмовых балок и нижней обечайки бака;
- выполнить бак «облегающей» формы и разработать метод его расчета на механическую прочность;
- применить опытную конструкцию прямотрубных радиаторов (диаметр трубы 30 мм) и различных типов вентиляторов.

Комплекс принятых конструктивных мер позволил снизить полную массу трансформатора примерно на 20% по сравнению с ГОСТ 12965-85 при некотором снижении потерь х.х. и к.з.



Динамика изменений технических характеристик трансформатора ТДТН-40000/110 — типопредставителя 110 кВ с РПН

По результатам проведенных исследований отмечалась необходимость доработки ряда конструктивных решений и примененных материалов, в частности, материала стяжки блока.

В рамках работ по улучшению технических параметров трансформаторов в конце 1989 г. в ВИТ было проведено совещание, обсудившее технические требования на их обновление. В совещании приняли участие ведущие специалисты Минэнерго СССР, специалисты ВИТ и заводов, изготавливающих трансформаторы 110 кВ. Совещание приняло ряд решений по этому вопросу. В частности, предлагалось разрабатывать трехобмоточные трансформаторы без регулирования напряжения с помощью ПБВ в обмотке СН. При этом для ремонтных целей предусматривалось изготавливать трансформаторы с ПБВ по ГОСТ 12965-85.

Однако, в связи с начавшейся «перестройкой», системность работ по дальнейшему улучшению технических параметров трансформаторов была приостановлена, и проведенные исследования не были реализованы.

Тем не менее, в 1989–1991 гг. для ЗТЗ были разработаны ВИТ трансформаторы ТДТН-40000/110 и ТДТН-25000/110 без ПБВ в обмотке СН, а в 1996 г. выполнен технический проект аналогичного трансформатора ТДТН-25000/110 для МЭЗ.

Особенностью разработанных трансформаторов являлось применение более совершенной продольной изоляции линейного конца обмотки ВН, которое стало возможным благодаря совершенствованию конструкции обмотки и метода расчета продольной изоляции.

6. Разработка и внедрение в производство трехобмоточных трансформаторов со сниженными мощностями обмоток СН и НН. В этой работе использованы результаты исследований фактических загрузок трансформаторов, выполненных совместно институтом «Энергосетьпроект» (г. Москва) и ВИТ, а также ТЭЗ. Как показали исследования, при номинальной нагрузке обмотки ВН загрузки обмоток СН и НН не превышали 67% номинальной мощности трансформатора. Работа была начата в начале 80-х годов прошлого века параллельно в ВИТ и на ТЭЗ. Ее цель — снижение материалоемкости изделий.

В результате в ВИТ был разработан и на ЗТЗ изготовлен головной образец трансформатора ТДТН-25000/110. Трансформатор имел концентрическое расположение обмоток на стержне магнитной системы и соотношение мощностей ВН/СН/НН — 100/67/67%.

Трансформатор прошел комплекс необходимых испытаний и с рядом рекомендаций был принят МВК в 1987 г. Рекомендации, в основном, касались его стойкости к токам к.з.

В это же время на ТЭЗ разрабатывается и изготавливается аналогичный трансформатор с аксиальным расположением обмоток СН и НН (по типу ТРДН). В зависимости от требуемого соотношения мощностей ВН/СН/НН трансформатор имел три исполнения 100/67/33%, 100/50/50%, 100/33/67%.

К сожалению, Минэнерго СССР не проявило заинтересованности к выполненным работам и не высказалось однозначно в пользу той или иной конструкции.

Необходимо отметить, что в конструкции трансформатора ВИТ использовано новое техническое решение — отдельно вынесенный регулировочный центр обмотки СН (ПБВ), который вместе с регулировочным центром обмотки ВН образовывал блок регулировочных обмоток. Это открывало путь для дальнейшего совершенствования главной изоляции трехобмоточных трансформаторов.

7. Создание, организация серийного производства отечественных переключющих устройств, взаимозаменяемых с переключющими устройствами НРБ по присоединительным размерам.

Переключающее устройство типа РНТА-35/200 разработано в ВИТ в 1993 г., серийное производство организовано на ТЭЗ в конце 90-х годов прошлого века. Конструкции трансформаторов, изготавливаемых на ТЭЗ, были переработаны под эти устройства.

8. Следует отметить разработку и внедрение в производство двухобмоточных трансформаторов с форсированной системой охлаждения (ФСО). Работа выполнялась в 70-80-х годах прошлого века на ТЭЗ, целью которой являлось снижение установленной мощности трансформаторов на двухтрансформаторных подстанциях. Смысл такого снижения заключался в том, что в аварийном режиме, при выходе из строя одного из трансформаторов, включалась в работу форсированная система охлаждения и второй трансформатор воспринимал более высокую нагрузку по сравнению с действующими нормами.

9. Разработка межгосударственного стандарта ГОСТ 12965-93 «Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические условия». ГОСТ разработан ВИТ в 1992-1993 гг. и учитывал изменения и дополнения, которые возникли после 1985 г. В частности, в него были включены некоторые трансформаторы со сниженной мощностью обмоток СН и НН, трансформаторы с форсированной системой охлаждения и другие дополнения. К сожалению, по ряду причин стандарт не стал нормативным документом для всех стран СНГ.

В настоящее время ВИТ разрабатывает новое поколение серий трансформаторов 110 кВ с РПН мощностью 25-80 МВА с использованием новых технических решений, комплектующих изделий и материалов.

Расчет стойкости трансформаторов к токам к.з. выполняется по методике ВИТ, которая более полно отражает физические процессы, происходящие в обмотках и изоляции при к.з.

По результатам выполненной работы внедрен в промышленное производство на МЭЗ трансформатор ТРДЦН-63000/110 нового поколения.

Представляет интерес динамика изменений технических характеристик трансформаторов за рассмотренные этапы их развития, которая приведена на рисунке для типопредставителя серий — трансформатора ТДТН-40000/110.

Смагин Александр Петрович — старший научный сотрудник Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ОАО «ВИТ»), г. Запорожье (38061) 2845227 postmaster@vit.zp.ua

РАЗРАБОТКИ ОАО «ВИТ» В ОБЛАСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Килевой В.К.

Представлен краткий обзор разработок ОАО «ВИТ» в области измерительных трансформаторов (тока и напряжения). Измерительные трансформаторы предназначены для применения в схемах измерения мощности потерь силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов, а также в схемах измерения погрешностей измерительных трансформаторов общепромышленного назначения.

Ключевые слова: измерительные трансформаторы; трансформаторы тока; трансформаторы напряжения; индуктивные делители напряжения; погрешности; элегаз

Общая характеристика трансформаторов

Одним из направлений деятельности ОАО «ВИТ», которое интенсивно развивается в последнее время, является разработка, изготовление, испытания, метрологическая аттестация и поставка Заказчикам измерительных трансформаторов классов точности 0,1 и 0,05. Трансформаторы напряжения, разработанные

в ОАО «ВИТ», предназначены для применения либо в схемах измерения мощности потерь силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов, либо в схемах измерения погрешностей трансформаторов напряжения общепромышленного назначения. Трансформаторы тока, описанные ниже, были спроектированы для применения в схемах измерения мощности потерь силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов.

Основные параметры и характеристики трансформаторов напряжения (ТН) приведены в табл. 1, а трансформаторов тока (ТТ) — в табл. 2.

Измерительные газонаполненные трансформаторы, изготовленные в ОАО «ВИТ», имеют высокую степень герметичности. Утечка элегаза из них не превышает 1% от массы заполненного элегаза в год. Это позволяет их эксплуатировать на протяжении многих лет без дозаправки, с минимальными затратами времени и средств на подготовку к работе

Таблица 1

Основные параметры и характеристики трансформаторов напряжения

Обозначение трансформатора	Значение параметра, характеристики						
	$U_{1н}$, кВ	$U_{2н}$, В	S_n , ВА	$f_{ун}$, %	δ_n , мин.	В/Л/Н, мм	Масса, кг
НОМ-15- I	1; 2; 3; 6; 10; 15	100	5	$\pm 0,1$	± 5	600/364/275	75
НОМО-15	$15/\sqrt{3}$; $10/\sqrt{3}$; $6/\sqrt{3}$; $3/\sqrt{3}$; 15; 10; 6; 3	$100/\sqrt{3}$; 100	5	$\pm 0,1$	± 5	280/364/545	80
ЗНОМ-35- I	$35/\sqrt{3}$; $24/\sqrt{3}$; $15/\sqrt{3}$; $10/\sqrt{3}$; $6/\sqrt{3}$; $3/\sqrt{3}$	$100/\sqrt{3}$	5	$\pm 0,05$	± 3	660/490/490	145
ТНО-220- I	$110/\sqrt{3}$; $150/\sqrt{3}$; $154/\sqrt{3}$; $220/\sqrt{3}$	$100/\sqrt{3}$; 100; 100:3	5	$\pm 0,1$ $\pm 0,2$	± 5 ± 10	1870/860/860	970
ТНО-330- II	$110/\sqrt{3}$; $150/\sqrt{3}$; $154/\sqrt{3}$; $220/\sqrt{3}$; $330/\sqrt{3}$	$100/\sqrt{3}$; 100; 100:3	5	$\pm 0,1$ $\pm 0,2$	± 5 ± 10	2080/860/860	1000
ТНООГ-220- I	$110000/\sqrt{3}$; $220000/\sqrt{3}$	$100/\sqrt{3}$; 100	5	$\pm 0,1$ $\pm 0,2$	± 5 ± 10	2550/805/580	315
ТНООГ-330- I	$35/\sqrt{3}$; $110/\sqrt{3}$; $220/\sqrt{3}$; $330/\sqrt{3}$	$100/\sqrt{3}$;	5	$\pm 0,15$	$\pm 6,5$	3085/1405/800	610

$U_{1н}$ — номинальное первичное напряжение трансформатора;

$U_{2н}$ — номинальное выходное напряжение трансформатора;

S_n — номинальная мощность нагрузки трансформатора;

$f_{ун}$ — нормируемая погрешность по напряжению;

δ_n — нормируемая погрешность по углу;

В; Л; Н — габаритные размеры трансформатора;

* — трехфазное линейное напряжение.

Таблица 2

Основные параметры и характеристики трансформаторов тока

Обозначение трансформатора	Значение параметра, характеристики							
	$U_{1н},$ кВ	$I_{1н},$ А	$I_{2н},$ А	$S_n,$ ВА	$f_{ин},$ %	$\delta_n,$ мин.	В/Л/Н, мм	Масса, кг
ТОМ-15- I	15	5; 7,5; 10;15; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300	5	5	$\pm 0,1$	± 5	535/395/450	82
ТОГ-35- II	35	1; 2; 5; 10; 20; 40; 80; 150; 300; 400; 600; 1200	1	5	$\pm 0,05$	± 3	720/513/513	110

$I_{1н}$ — номинальный первичный ток трансформатора;
 $I_{2н}$ — номинальный вторичный ток трансформатора;
 $f_{ин}$ — нормируемая погрешность по току

и техническое обслуживание. Негативное влияние этих трансформаторов на окружающую среду практически отсутствует.

Все описанные в настоящей статье измерительные трансформаторы были изготовлены в ОАО «ВИТ» единичными экземплярами или мелкими партиями для Заказчиков из Украины, России, Республики Беларусь, либо для собственного применения. Они прошли государственную метрологическую аттестацию, которая подтвердила их соответствие требованиям технических заданий и показала, что многие из них имеют либо могут иметь при соответствующей витковой коррекции погрешности существенно меньше нормируемых. Изготовленные в ОАО «ВИТ» измерительные трансформаторы эксплуатируются на протяжении ряда лет. Суммарная наработка составляет не менее 80 трансформаторо-лет. Случаев отказа трансформаторов по причине некачественного изготовления не было.

Маслонаполненные трансформаторы напряжения

Трансформатор напряжения с изолированной нейтралью, однофазный, маслонаполненный, с наибольшим значением номинального напряжения первичной обмотки 15 кВ номера варианта конструктивного исполнения 1 НОМ-15-I предназначен для применения в составе системы измерения мощности потерь при испытаниях силовых трансформаторов и реакторов. Конструктивные особенности трансформатора напряжения НОМ-15-I показаны на рис. 1. Основные составные части трансформатора — это часть активная (1) и бак (2). Часть активная состоит из магнитопровода (1.1), блока обмоток (1.2), изоляционного цилиндра (1.3), выводов высокого и низкого напряжений (соответственно, 1.4 и 1.5), крышки (1.6) и изоляционного фланца (1.7). Магнитопровод (1.1) бронестержневого типа выполнен шихтовкой прямоугольных пластин из анизотропной холоднокатаной электротехнической стали.

Блок обмоток (1.2) состоит из первичной обмотки (высокого напряжения) и вторичной обмотки (низкого напряжения), установлен на стержне магнитопровода (1.1) и раскреплен при помощи клиньев. Первичная обмотка выполнена в виде последовательно включенных секций, отводы от которых изолированы друг относительно друга и относительно заземленных частей трансформатора

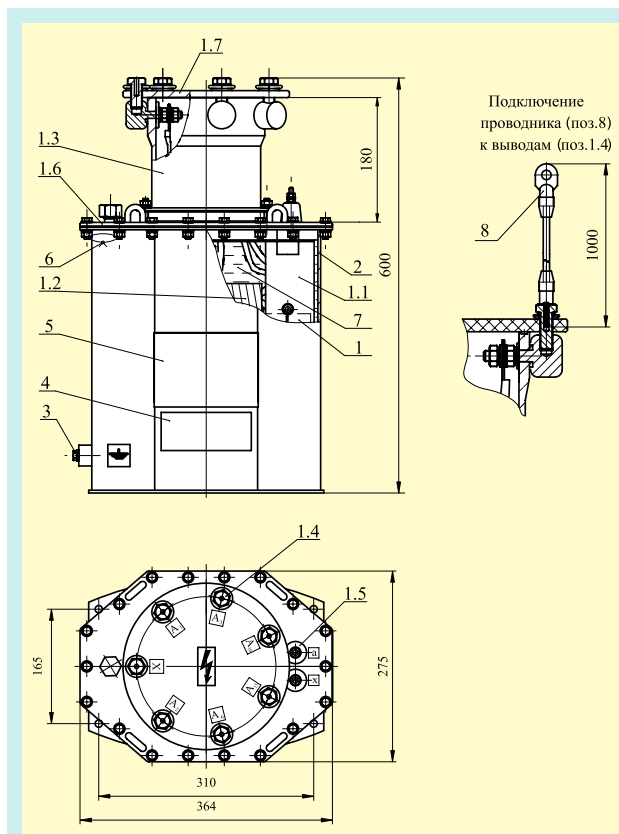


Рис. 1. Трансформатор напряжения НОМ-15-I

- 1 — часть активная;
- 1.1 — магнитопровод;
- 1.2 — блок обмоток;
- 1.3 — цилиндр;
- 1.4 — вывод ВН;
- 1.5 — выводы НН;
- 1.6 — крышка;
- 1.7 — фланец;
- 2 — бак;
- 3 — заземляющий зажим;
- 4, 5 — таблички;
- 6 — пломба;
- 7 — трансформаторное масло;
- 8 — проводник

и выведены на изоляционный фланец (1.7). Вторичная обмотка выполнена в виде одной секции. Ее выводы расположены на крышке (1.6). Крышка выполнена в виде металлической плиты, на которую крепятся магнитопровод (1.1) с блоком обмоток (1.2) и цилиндр (1.3). На крышке имеются скобы,

необходимые для подъема и перемещения трансформатора с помощью грузоподъемных механизмов. Бак трансформатора выполнен из листовой конструкционной стали методом сварки. Баку придана форма, рационально приближенная к форме активной части трансформатора. На баке трансформатора установлены: заземляющий зажим (3) в виде бобышки и болта, табличка трансформатора с техническими данными (4), табличка с указаниями по включению трансформатора при различных значениях номинального первичного напряжения (5), а также пломбы (6). Бак трансформатора заполнен трансформаторным маслом (7). Для заливки трансформатора маслом на крышке (1.6) предусмотрен штуцер, закрытый накидной гайкой с прокладкой. В трансформаторе применена негигроскопичная твердая изоляция, которая не нуждается в сушке и не увлажняется в процессе эксплуатации. Как следствие, уменьшаются затраты на изготовление и эксплуатацию трансформатора, повышается его эксплуатационная надежность. Вторичная обмотка трансформатора постоянно включена в схему измерения потерь. В зависимости от значения высокого напряжения, подлежащего измерению при помощи проводника (8) со штекерным разъемом на конце, трансформатор удобно и быстро может быть подключен к нему выводом ВН (1.4) на соответствующее номинальное напряжение.

Трансформатор напряжения с изолированной нейтралью, однофазный, маслonaполненный, образцовый с наибольшим значением номинального напряжения первичной обмотки 15 кВ (НОМО-15) предназначен для применения в схемах поверки трансформаторов напряжения общепромышленного назначения классов напряжения 3-15 кВ. НОМО-15 (рис. 2) конструктивно во многом подобен трансформатору НОМ-15-1. Основные отличия заключаются в следующем. Первичная обмотка трансформатора состоит лишь из двух последовательно включенных секций. Их концы выведены из трансформатора через фарфоровые изоляторы.



Рис. 2. Трансформатор напряжения НОМО-15

Вторичная обмотка выполнена также секционированной. Указания по включению трансформатора при различных значениях номинального первичного напряжения содержатся в специальной табличке и в эксплуатационной документации на трансформатор.

Внешний вид трансформатора ЗНОМ-35-1 показан на рис. 3. Трансформатор напряжения ЗНОМ-35-1 предназначен для применения в составе системы измерения мощности потерь при испытаниях силовых трансформаторов и реакторов. Он конструктивно во многом подобен трансформатору НОМ-15-1. Основное отличие состоит в том, что крышка из электроизоляционного стеклопластика выполняет одновременно две функции — бака для размещения части активной и внешней изоляции трансформатора.



Рис. 3. Трансформатор напряжения ЗНОМ-35-1

Трансформаторы напряжения ТНО-220-1 и ТНО-330-1 конструктивно подобны. Внешний вид трансформатора ТНО-220-1 показан на рис. 4. Трансформаторы этой группы состоят из понижающего трансформатора и индуктивного делителя напряжения, обмотки которых соединены проводниками. Обмоточные данные трансформатора и делителя выбраны такими, что удастся получить множество коэффициентов трансформации в диапазоне от $1100/\sqrt{3}$ до 3300 с высокой точностью воспроизведения.

Газонаполненные трансформаторы напряжения

В ОАО «ВИТ» разработаны два типа газонаполненных трансформаторов напряжения высокой точности — ТНООГ-220-1 и ТНООГ-330-1.

Внешний вид трансформатора напряжения однофазного образцового газонаполненного с наибольшим значением номинального первичного напряжения $220/\sqrt{3}$ кВ варианта конструктивного исполнения 1 (ТНООГ-220-1) показан на рис. 5. Внутри корпуса трансформатора установлена часть активная, которая представляет собой магнитопровод бронестержневого типа с установленными на него двумя обмотками и экранами. Магнитопровод



Рис. 4. Трансформатор напряжения ТНО-220-I

набран способом шихтовки из листов холоднокатаной электротехнической стали с термостойким изоляционным покрытием. Стяжка пластин ярма магнитопровода выполнена при помощи рам из стальных неравнополочных уголков и бандажей из стеклоленты. Вторичная обмотка (низкого напряжения) выполнена слоевой секционированной из прямоугольного медного провода с лаковым покрытием. Обмоточные данные обмотки низкого напряжения выбраны такими, что удастся получить четыре коэффициента трансформации ($1100/\sqrt{3}$; 1100; $2200/\sqrt{3}$ и 2200)



Рис. 5. Трансформатор напряжения ТНООГ-220-I

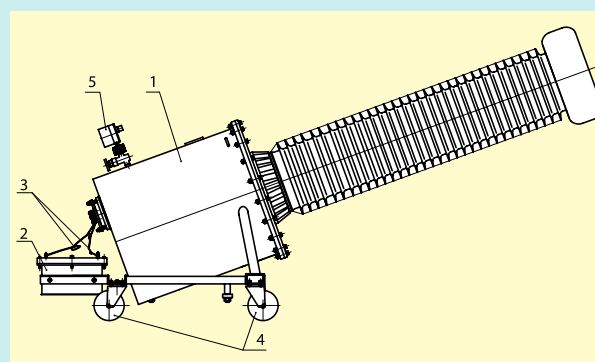


Рис. 6. Трансформатор напряжения ТНООГ-330-I

- 1 — понижающий трансформатор;
- 2 — индуктивный делитель напряжения;
- 3 — проводники;
- 4 — колеса;
- 5 — мановакуумметр

с высокой точностью воспроизведения. Первичная обмотка (высокого напряжения) выполнена слоевой из медного круглого провода с лаковым покрытием. Главная и межслоевая изоляция обмоток выполнены из синтетической пленки. Снаружи обмотки ВН и на ярмах магнитопровода установлены экраны специальной формы, которые создают слабонеоднородное электрическое поле. Первичная и вторичная обмотки выполнены в виде единого блока. Этот блок обмоток установлен на стержне магнитопровода и раскреплен при помощи клиньев. Корпус состоит из цилиндрической и эллиптической обечаек, которые соединены друг с другом свариванием. К цилиндрической обечайке герметично присоединен клапан, который используется при вакуумировании и заполнении трансформатора элегазом, а также при эвакуации элегаза из трансформатора. В конструкции корпуса предусмотрены также фланцы для установки днища, ввода высокого напряжения и выводов низкого напряжения. Днище состоит из эллиптической обечайки, фланца, косынок, опорных пластин и бобышки для присоединения трансформатора к контуру заземления. В бобышке установлен болт заземления. Ввод высокого напряжения выполнен на базе изоляционной крышки из электроизоляционного стеклопластика.

Трансформатор ТНООГ-330-I (рис. 6) спроектирован для применения в передвижной установке, с помощью которой выполняется проверка трансформаторов напряжения общепромышленного назначения на месте их эксплуатации. Он состоит из понижающего трансформатора (1)

и индуктивного делителя напряжения (2) обмотки которых соединены проводниками (3). Часть активная ТНООГ-330-I во многом подобна части активной ТНООГ-220-I. Но обмотка низкого напряжения не секционирована, а множество номинальных коэффициентов трансформации, воспроизводимых с высокой точностью, достигается путем подключения к соответствующей секции делителя. Ввод высокого напряжения выполнен на базе композитного изолятора с покрытием из кремнийорганической резины. Понижающему трансформатору придано наклонное положение с тем, чтобы не иметь проблем с его транспортированием автомобильным транспортом общепромышленного применения. Установленные на трансформаторе колеса (4) позволяют перемещать его вдоль кузова транспортного средства, переводя его с транспортного положения в рабочее и обратно при помощи простого и удобного устройства. Давление элегаза в понижающем трансформаторе ТНООГ-330-I, которое контролируется с помощью манометра (5), значительно ниже, чем у ТНООГ-220-I. Поэтому его корпус имеет днище и крышку простых форм.

Трансформаторы тока

Внешний вид трансформатора тока опорного, газонаполненного, с изоляцией класса напряжения 35 кВ, варианта конструктивного исполнения 2 (ТОГ-35-II) показан на рис. 7.



Рис. 7. Трансформатор тока ТОГ-35-II

Внутри цилиндра из электроизоляционного пластика установлена часть активная, которая представляет собой магнитопровод кольцевого типа с намотанной на него вторичной обмоткой и изоляцией из синтетической пленки. Магнитопровод изготовлен из ферроникелевого железа с низкими значениями мощности намагничивания и потерь. Выводные концы вторичной обмотки присоединены к выводам, расположенным в нижней части трансформатора и имеющим маркировку И1 и И2. Первичная обмотка выполнена в виде секций, соединенных друг с другом, которые присоединены к выводам, имеющим маркировку Л1-

Л13 и расположенным в верхней части трансформатора. Форма выводов первичной обмотки трансформатора выбрана такой, что позволяет подключать их к первичному контуру электроустановки с помощью быстросъемных розеточных контактов (трансформатор комплектуется ими). В местах крепления цилиндра к основанию и к фланцу установлены экраны специальной формы. Герметичность разъемных соединений трансформатора обеспечивается резиновыми уплотнениями. В нижней части трансформатора имеются скобы, предназначенные для строповки трансформатора, если необходимо поднять и переместить трансформатор с помощью грузоподъемных механизмов. Рядом со скобами нанесены знаки «места строповки». В нижней части трансформатора имеется втулка для присоединения трансформатора к контуру заземления. Трансформатор заполнен элегазом до давления, немногим выше атмосферного. Клапан сильфонный, установленный в основании трансформатора, позволяет осуществлять операции вакуумирования внутренней полости трансформатора, заполнения ее элегазом, а если необходимо — эвакуации элегаза.

Внешний вид трансформатор тока ТОМ-15-1 показан на рис. 8. Как видно по конструкции он во многом подобен ТОГ-35-II. Главное отличие состоит в том, что он заполнен трансформаторным маслом. Кроме этого, он не имеет наружных экранов, изменена конструкция основания и составных частей для крепления изоляционного цилиндра к основанию. Эти изменения направлены на снижение технологической себестоимости изготовления трансформаторов и улучшение их дизайна.



Рис. 8. Трансформатор тока ТОМ-15-I

Килевой Владимир Кузьмич — главный конструктор Украинского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ОАО «ВИТ»), г. Запорожье (38061) 2845215 postmaster@vit.zp.ua

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СРОКА СЛУЖБЫ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Кулик Л.А., Манвелидзе С.Г.,
Краснобаева Н.В., Грановская В.А.

Приведены результаты исследований теплового старения на моделях обмоток, имитирующих конструкцию обмотки класса напряжения 35-110 кВ при температуре наиболее нагретой точки обмотки 125, 140 и 160 °С, а также результаты ресурсных испытаний реальных трансформаторов ТМ-1600/35 в режимах нормируемых аварийных перегрузок.

Ключевые слова: целлюлозная изоляция; разрушающий фактор; модель обмотки; наиболее нагретая точка; тепловое старение; срок службы; ресурсные испытания

Для правильного выбора мощности трансформатора, обеспечения его оптимальной загрузки в эксплуатации и определения ожидаемого срока службы необходимо знание закономерностей старения электрической изоляции. Критерием оценки ее состояния служит прежде всего степень износа целлюлозной изоляции, так как трансформаторное масло при несоответствии его качества требованиям научно-технической документации может быть заменено.

Старение изоляции в процессе эксплуатации оборудования обусловлено влиянием большого количества разных факторов (тепловых, механических и электрических нагрузок, аналогичных существующим в реальных конструкциях трансформаторов), в том числе и факторов, контроль которых весьма трудно обеспечить.

Температурные, электрические, механические разрушающие факторы, а также факторы окружающей среды (влажность, кислород, загрязняющие вещества и др.) определяют различные и достаточно сложные механизмы старения изоляционных материалов. Необратимые изменения свойств изоляции могут происходить под влиянием как одного из разрушающих факторов, так и их совокупности. Поэтому темпы старения изоляции имеют случайный характер.

Срок службы изоляции, определенный на образцах материалов, не дает необходимой информации для оценки срока службы изделий, так как при работе в конструкции с другими материалами и при воздействии всех факторов, имеющих место в эксплуатации,

срок службы изоляции может существенно отличаться. Недостаточность оценки срока службы изделий по характеристикам материалов общепризнана.

Достаточно достоверные результаты могут быть получены при испытании моделей, которые воспроизводят конструкцию и материалы обмоток определенной группы трансформаторов, а также механизмы старения, идентичные действующим в процессе эксплуатации и определяющие ресурс работоспособности данной конструкции.

В ВИТ проводились исследования по определению ресурса работоспособности целлюлозной изоляции на моделях обмоток, имитирующих обмотку трансформатора классов напряжения 35–110 кВ.

Модель (рис. 1) состояла из бакелитового цилиндра, на котором были намотаны 32 катушки непрерывной обмотки. В каждой катушке — три витка из параллельных проводов. Размеры провода без изоляции 7,5-2,5 мм. Изоляция провода — бумага марки ТВУ-080 толщиной 0,96 мм на обе стороны, дистанционные прокладки и рейки — из жесткого (уплотненного) картона. Количество моделей — 26 штук.

Размеры вертикальных масляных каналов, каналов между катушками, а также размеры катушек выбраны такими же, как у трансформаторов классов напряжения 35-110 кВ:

- внутренний диаметр обмотки — 250 мм;
- наружный диаметр обмотки — 350 мм;
- масляный канал между катушками — 3,2 мм;
- вертикальный канал — 10,0 мм.

Модели обмоток опрессовывались в стяжных алюминиевых плитах толщиной 40 мм для обеспечения их устойчивости при испытаниях ударным током короткого замыкания.

На моделях, предназначенных для контроля температурного режима в процессе теплового старения, ко второму проводу среднего витка катушек, расположенных в верхней, средней и нижней частях обмоток, припаивались по две термопары (во время изготовления моделей).

Все модели обмоток подвергались сушке и пропитке сухим трансформаторным маслом, после



Рис. 1. Общий вид модели обмотки для ресурсных испытаний



Рис. 2. Общий вид обмотки в баке

чего на восьми моделях определялось пробивное напряжение и выбиралось испытательное напряжение, равное 60 % среднего пробивного напряжения моделей.

Каждая из остальных моделей (18 шт.) помещалась в бак (рис. 2) и заливалась трансформаторным маслом. Баки с моделями устанавливались на стенды теплового старения (по 6 шт.). Для контроля температуры на каждом стенде устанавливался бак с моделью, на которой припаяны термодары. Выводы всех моделей на стенде соединялись между собой последовательно, напряжение на модели подавалось от регулировочного трансформатора (нагрев моделей осуществлялся переменным током). На крышках баков устанавливались термометры для контроля температуры верхних слоев масла.

Перед тепловым старением все модели испытывались напряжением, превышающим испытательное на 10% ($1,1U_{исп}$).

Тепловое старение моделей проводилось циклами при температуре наиболее нагретой точки обмотки 125, 140 и 160 °С (табл. 1). Продолжительность цикла при температуре 160 °С — 20 суток, при температуре 140 °С — 40 суток, при температуре 125 °С — 100 суток.

Таблица 1

Значения температуры изоляции по высоте обмоток в процессе теплового старения моделей

Место измерения температуры	Температура изоляции в процессе теплового старения, °С		
	при 125 °С	при 140 °С	при 160 °С
Верх обмотки	125±2	140±2	160±2
Середина обмотки	125±2	128±2	142±2
Низ обмотки	85±2	111±2	122±2

После каждого цикла старения модели подвергались:

- воздействию испытательного напряжения 14 кВ в течение 1 мин при температуре 90 °С;
- испытанию ударным током короткого замыкания на стенде динамических воздействий (от 2 до 5 раз).

Испытания проводились в баке без слива масла при температуре окружающей среды.

Тепловое старение моделей проводилось до их повреждения либо в процессе динамических воздействий, либо при воздействии одноминутного испытательного напряжения (табл. 2).

В процессе теплового старения моделей из баков отбирались пробы масла для анализа, определялись его показатели (табл. 3). На протяжении исследования масло в баках не менялось.

Таблица 2

Выход моделей из строя в процессе теплового старения при температурах 125, 140 и 160 °С

Номер модели	125 °С		140 °С		160 °С	
	Время старения до повреждения модели, сутки	Номер модели	Время старения до повреждения модели, сутки	Номер модели	Время старения до повреждения модели, сутки	Номер модели
22	1250	15	600	10	50*	
23	900	16	360	11	50*	
24	1250	17	400	12	–	
25	1200	18	200*	13	110	
26	900	19	600	14	50*	

Примечание — *значения не учитывались при расчете среднего ресурса, так как при испытании на динамическую стойкость было приложено удельное давление на дистанционные прокладки 20 МПа (на все остальные модели 15 МПа).

Таблица 3

Показатели трансформаторного масла в процессе старения моделей при температурах 125, 140 и 160 °С

Наименование показателей	Время отбора проб, сутки						
	Исходное	160 °С		140 °С		125 °С	
		60	120	360	900	1200	
Пробивное напряжение, кВ	48	44	19	42	47	45	
Тангенс угла диэлектрических потерь, %	1,1	1,3	14	23,5	6,3	9,6	
Кислотное число, мг КОН/г	0,013	0,18	0,2	1,8	0,035	0,039	
Влагосодержание, г/т	15,0	27,8	131	45,0	18,0	27,0	

После выхода моделей из строя из баков отбирались пробы масла для анализа, обмотки разбирались для обнаружения места пробоя и отбирались пробы изоляции для определения влагосодержания и степени полимеризации (табл. 4).

При вскрытии баков с моделями обмоток, тепловое старение которых проходило при температурах 140 и 160 °С, было обнаружено, что масло в баках очень темное, с большим количеством шлама; модели обмоток покрыты значительным осадком, поэтому после 400 и 600 суток старения при температуре 140 °С определить характеристики масла было невозможно.

При разборке моделей место пробоя удалось обнаружить в основном только у тех моделей, которые не выдержали динамических испытаний.

Витковая изоляция темная, хрупкая, при разборе моделей осыпается. Очень хрупкая — на катушках верхней половины моделей. На нижних катушках — темный только верхний слой.

На основании проведенных исследований установлен ресурс моделей обмоток (L), который составил:

- при температуре 160 °С — 110 суток;
- при температуре 140 °С — 490 суток;
- при температуре 125 °С — 1100 суток.

Обработка экспериментальных данных выполнялась на основании уравнений:

$$Y = a + b \cdot X; \quad Y = \lg L,$$

где Y — срок службы изоляции;

a и b — коэффициенты прямой линии;

Таблица 4

Значения степени полимеризации и влагосодержания после теплового старения при температурах 125, 140 и 160 °С

Температура, °С	Номер бака с моделями	Время старения, сутки	Место отбора проб изоляции с обмотки	Степень полимеризации		Влагосодержание, %	
				Бумага	Картон	Бумага	Картон
			Серед.	280	290	2,00	0,70
			Низ	685	1460	3,21	2,71
			Верх	289	257	0,52	0,57
160	14	120	Серед.	280	285	0,30	0,40
			Низ	501	1000	1,20	1,70
			Верх	270	437	0,86	1,36
			Серед.	292	498	1,03	0,86
			Низ	355	701	1,63	2,30
			Верх	198	215	1,20	1,14
140	16	600	Серед.	200	339	1,37	0,94
			Низ	552	680	1,63	2,43
			Верх	442	695	2,14	1,43
			Серед.	513	1183	2,64	2,00
			Низ	727	1823	2,86	2,43
			Верх	461	524	1,93	1,31
125	26	1000	Серед.	527	916	2,00	1,98
			Низ	706	1848	2,86	2,43

$X = 1/(273 + \theta)$ — для каждой фактической температуры испытаний, К;

θ — температура испытаний, °С;

L — ресурс каждой модели обмоток при данной температуре.

Срок службы целлюлозной изоляции моделей обмоток в зависимости от температуры выражается уравнением:

$$Y = - 7,9396 + 0,4934 \cdot 10^4 \cdot X.$$

После обработки полученных экспериментальных данных был определен ресурс работоспособности целлюлозной изоляции:

- при температуре 98 °С — 26,0 лет;
- при температуре 120 °С — 4,68 года;
- при температуре 140 °С — 1,16 года;
- при температуре 160 °С — 0,32 года.

Таблица 5

Параметры режимов испытаний трансформаторов ТМ-1600/35

Трансформатор	Режим нагрузки			Число выдержанных к.з. и серий СГИ	Время под нагрузкой до отказа, ч	Расчетный относительный износ до отказа	Повреждение (отказ)				
	Коэффициент нагрузки (Кн)	Температура наиболее нагретой точки, °С	Средняя температура масла в баке, °С				При включении на			Место	
							к.з.	нагрузку		Фаза	Обмотка
								Номер к.з.	Номер цикла		
T1	1,75	185	87	10	15,0	1,590	нет	после 11	0,75	В	ВН
T2	1,49	148	81	8	836,0	1,226	9	-	-	В	НН
T3	1,62	165	83	9	86,2	0,900	нет	конец 10	1,62	В	ВН
T4	1,70	167	73	9	86,0	1,140	нет	10	1,69	А	НН
T5	1,73	184	89	19	37,0	3,510	20	-	-	В	НН

Таблица 6

Характеристики контрольных воздействий и методы обнаружения повреждений

Трансформатор	Число выдержанных к.з.	Амплитуда ударного тока к.з. в фазе В, А			Повреждающее воздействие		Включение на K_n	Каким методом обнаружено повреждение
		минимальная	максимальная	средняя	Номер к.з.	Максимальная амплитуда, А		
T1	10	1740	2890	2420	-	-	0,75	$R_{обм}; U_k, P_k$ В газ. реле: H_2, CH_4
T2	8	1580	2720	2270	9	2420	-	$R_{обм}; U_k, P_k, НВИ$ В газ. реле: $H_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_6$
T3	9	2340	2930	2660	-	-	1,62	$R_{обм}$
T4	9	1560	2970	2530	-	-	1,69	$R_{обм}$
T5	19	2460	3360	2890	20	2800	-	$R_{обм}; U_k, P_k$ В газ. реле: H_2, CH_4

Учитывая, что наилучшие результаты дают ресурсные испытания реальных трансформаторов, были изготовлены пять трансформаторов ТМ-1600/35 и направлены в НИИПТ (г. Санкт-Петербург) для проведения на договорной основе ресурсных испытаний в режимах нормируемых аварийных перегрузок.

Испытания проводились при номинальном напряжении с ускорением по нагреву (в режимах нормированных аварийных токовых перегрузок) в диапазоне длительно действующих расчетных температур наиболее нагретой точки (от 148 до 185 °С); периодически воспроизводились серии грозовых импульсов в обмотках НН (срезанная волна) и трехфазные короткие замыкания (от сети). Критерием отказа служило разрушение обмотки с последующим контролем средней степени полимеризации витковой изоляции.

Сводные данные по параметрам режимов испытаний, характеристики контрольных воздействий и методы обнаружения повреждений представлены в табл. 5, 6.

Полученные результаты дали основания для следующих выводов:

- средний ресурс трансформатора ТМ-1600/35 составляет примерно 35 лет;

- расходование ресурса такого трансформатора практически полностью определяется термическим износом витковой изоляции его обмоток (все отказы произошли при средней степени полимеризации бумаги витковой изоляции в наиболее нагретой части обмотки от 200 до 400 °С, изоляция в верхней части обмоток хрупкая);

- термический износ витковой изоляции в диапазоне температур от 148 до 185 °С приблизительно следует закону Аррениуса, однако небольшой объем эксперимента не позволяет экстраполировать полученную зависимость к базовой температуре 98 °С с необходимой степенью достоверности;

- оценка температурного интервала удвоения скорости термического износа составляет в указанном выше диапазоне температур Δ~6-7, с тенденцией к возрастанию в области температур >165 °С.

Характеристики изоляции $R_{из}$ и $tg\delta_{из}$ в процессе ресурсных испытаний всех трансформаторов вплоть до отказа оставались в норме и мало изменились.

Нормируемые характеристики масла: кислотное число, температура вспышки и $tg\delta_{70°C}$ у всех трансформаторов оставались в норме, а у трансформаторов в области температур ≤ 167 °С практически не изменились; то же относится и к значению поверхностного натяжения.

Данные, полученные в результате исследований, проведенных на моделях обмоток и реальных трансформаторах, подтверждают, что срок службы трансформаторов, указанный в ГОСТ 11677-85 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия», составляет не менее 25 лет.

Кулик Лидия Алексеевна – заместитель главного технолога (38061) 2845269 ogt@vit.zp.ua

Манвелидзе Сергей Гурамович – начальник лаборатории диэлектриков и механических испытаний отдела главного технолога (38061) 2845267 ogt@vit.zp.ua

Краснобаева Наталья Владимировна – инженер-технолог 2 категории отдела главного технолога (38061) 2845267

Грановская Вера Александровна – инженер (38061) 2785773

Все авторы – сотрудники Украинского научно-исследовательского проектно-конструкторского и технологического института трансформаторостроения (ОАО «ВИТ»), г. Запорожье

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ РЕКЛАМОДАТЕЛЕЙ

РАСЦЕНКИ на размещение рекламы в журнале

ЭЛЕКТРО

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА • ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Тарифы на размещение рекламы указаны в рублях
Вся реклама полноцветная (печатается в 4 краски)

Обложка 2-я полоса	19000
Обложка 3-я полоса	17000
Основная часть блока (формат А4)	
Разворот (2 полосы)	25000
1/1 полосы	14000
3/4 полосы	11000
1/2 полосы	9000
1/4 полосы	6000
1/8 полосы	3000
1/16 полосы	1500
строчная информация	300

Предложения по размещению рекламы на страницах журнала направлять по адресу:

107023, Москва,

Электrozаводская ул. 21, «Электrozавод»,
Редакция журнала ЭЛЕКТРО

Справки по телефонам:

(499) 152-56-55, (495) 777-82-01,
факс (495) 777-82-11

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ РОССИИ

2009

01-04 ДЕКАБРЯ

Москва, ВВЦ павильон №69

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Совет ветеранов энергетиков

ЗАО «ТВЭСТ»

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

Минэнерго РФ

ОАО «Холдинг МРСК»

ОАО «Федеральная сетевая компания
Единой энергетической системы»
(ОАО «ФСК ЕЭС»)

В 2008 году в работе выставки и семинара «Электрические сети России» приняло участие более 340 фирм: акционерные общества энергетики и электрификации России, магистральные электрические сети ОАО «ФСК ЕЭС», электросетевые строительные, монтажные и проектные организации, энергетики стран СНГ, зарубежные фирмы и СП, производители оборудования, конструкций и материалов, специалисты-энергетики других отраслей промышленности из России, Украины, Беларуси, Казахстана, Армении, Великобритании, Германии, Индии, Канады, Сербии, США, Финляндии, Франции, Хорватии, Швейцарии, Швеции, Южной Кореи. Выставку посетило 32.000 человек.

Генеральные информационные спонсоры



Генеральный информационный спонсор
в сети Интернет

RusCable.Ru

Специальный информационный спонсор



Информационный спонсор семинара



Поддержка в сети Интернет



Время работы выставки

01 декабря

11:30 – 12:00 – ПРЕСС-КОНФЕРЕНЦИЯ

12:00 – 12:30 – ОФИЦИАЛЬНОЕ ОТКРЫТИЕ

12:30 – 18:00 – РАБОТА ВЫСТАВКИ

02-03 декабря

10:00 – 18:00 – РАБОТА ВЫСТАВКИ И СЕМИНАРА

04 декабря

10:00 – 12:00 – РАБОТА ВЫСТАВКИ

12:00 – ЗАКРЫТИЕ, НАГРАЖДЕНИЕ УЧАСТНИКОВ ВЫСТАВКИ

Разделы выставки:

Электротехническое оборудование и распределительные устройства.

Воздушные и кабельные линии электропередачи.

Устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики.

АСУ ТП и информатизация, связь, АСКУЭ.

Телефон/факс: (495) 771-6564, 963-4817

E-MAIL: [EXHIBIT@TWEST.RU](mailto:exhibit@twest.ru)

Сайт выставки: WWW.EXPOELECTROSETI.RU

Информационная поддержка



ЭЛЕКТРО