

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

Институт энергетики и электротехники  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование кафедры полностью)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем  
(направленность (профиль)/специализация)

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка методики расчета токов намагничивания силовых трансформаторов систем электроснабжения»

Студент

А.А. Кабанов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

В.В. Вахнина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина

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

(личная подпись)

«    »                      2017 г.

**Допустить к защите**

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

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

(личная подпись)

«    »                      2017 г.

Тольятти 2017

## Содержание

Введение.....	4
1 Анализ негативного воздействия постоянного тока на силовые трансформаторы систем электроснабжения.....	10
1.1 Процессы на солнце.....	10
1.1.1 Солнце.....	10
1.1.2 Солнечные вспышки.....	12
1.1.3 Корональный выброс массы.....	14
1.1.4 Протуберанцы.....	15
1.1.5 Солнечные пятна.....	20
1.1.6 Солнечный ветер.....	22
1.2 Влияние геомагнитных бурь на Землю.....	25
1.2.1 Влияние постоянных токов на силовые трансформаторы систем электроснабжения.....	25
1.2.2 Примеры различных аварий в системах электроснабжения.....	27
2 Силовые трансформаторы в системах электроснабжения.....	37
2.1 Принцип действия и их основные конструктивные элементы.....	37
2.1.1 Принцип действия.....	37
2.1.2 Виды трансформаторов.....	39
2.1.3 Магнитопроводы трансформаторов.....	40
2.1.4 Конструкция сердечников.....	45
2.1.5 Обмотки трансформаторов.....	47
2.1.6 Изоляция.....	51
2.1.7 Способы охлаждения масляных трансформаторов.....	54
2.1.8 Ввода силового трансформатора.....	59
2.1.9 Бак силового трансформатора с арматурой.....	61
2.1.10 Регулирование напряжения силового трансформатора.....	62
2.2 Намагничивание сердечников трансформаторов.....	67
2.2.1 Процесс намагничивания.....	67

2.2.2	Трёхфазный трансформатор с соединением обмоток звезда/треугольник.....	69
2.2.3	Трёхфазный трансформатор с соединением обмоток звезда/звезда ....	72
3	Компьютерное моделирование токов намагничивания в силовых трансформаторах при протекании постоянных токов в системе электроснабжения .....	75
3.1	Выбор типа моделей силовых трансформаторов .....	75
3.2	Компьютерное моделирование токов намагничивания в бронестержневых трансформаторах при протекании постоянных токов в системе электроснабжения .....	78
3.3	Анализ полученных данных для бронестержневого трансформатора.....	86
3.4	Компьютерное моделирование токов намагничивания в стержневых трансформаторах при протекании постоянных токов в системе электроснабжения .....	89
3.5	Анализ полученных данных для стержневого трансформатора.....	96
	Заключение .....	100
	Список использованной литературы.....	102

## Введение

Электроэнергетика - отрасль энергетики Российской Федерации, включающая в себя производство, передачу электрической энергии, оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике, сбыт и потребление электрической энергии. Электроэнергетика является важным инструментом функционирования экономики и жизнеобеспечения любого современного государства.

Система электроснабжения (СЭС) - совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией.

Главными требованиями предъявляемые к системам электроснабжения являются:

1. Обеспечение потребителей необходимым количеством электрической энергии.
2. Надежное функционирование всех её составляющих.
3. Обеспечение требуемого качества электроснабжения потребителей.
4. Удобство и безопасность обслуживания.

Любая технологическая система не застрахована от аварий, СЭС не является исключением. В результате аварий происходят вывод из строя электротехнического оборудования, пожары и взрывы на подстанциях, гибель обслуживающего персонала, остановка электроснабжения на неопределенный срок, экономические потери.

Аварии в СЭС можно разделить на следующие виды:

1. Ошибочные действия электротехнического персонала довольно частое явление. Возникают они из-за низкой квалификации, невнимательности, нарушения оперативной дисциплины при выполнении обязанностей. Чаще всего, это такие нарушения как подача напряжения путем включения коммутационных аппаратов, на заземленные токоведущие части. Подача напряжения на неисправное или находящееся в ремонте оборудование. Отключение либо включение нагрузки, коммутационными аппаратами не

предназначенными для этого. Ошибочные действия оперативного персонала при переключениях в цепях оперативного тока и цепях релейной защиты и автоматики (РЗА).

2. Некачественный электромонтаж или ремонт. К этим причинам можно отнести такие недоработки как плохая регулировка приводов коммутационных аппаратов, плохо протянутые контакты, неправильно настроенная система РЗА, заводские дефекты электрооборудования. Не затянутые контакты под нагрузкой начинают греться и гореть, возникает электрическая дуга и если защиты настроены плохо, возникает пожар на подстанции. Из-за плохой регулировки вката ячеек могут происходить короткие замыкания.

3. Неисправности в сетях РЗА могут быть следующие: неправильно настроенные токовые уставки, вследствие чего неселективное срабатывание защиты или ее отказ в момент короткого замыкания. Нарушение изоляции или обрывы проводов, в цепях оперативного тока, неисправность релейных или микропроцессорных блоков защиты.

4. Однофазные замыкания на землю в сетях 6-35кВ опасны тем, что если произойдет замыкание любой из фаз, то напряжение этой фазы относительно земли станет равно нулю, в то время как напряжение "здоровых" фаз повышается до линейных. Возникающие при этом перенапряжения приводят к пробое изоляции и возникновению электрической дуги. Все это приводит к разрушению изоляторов, оплавлению шин и проводов.

5. Грозовые и коммутационные перенапряжения в электрических сетях, могут стать причиной повреждения изоляции электрооборудования. Поэтому устройства грозозащиты подстанций и линий электропередач, должны быть в исправном состоянии и проходить регулярные проверки, в установленные нормативами сроки.

6. Стихийные бедствия. К ним относятся ураганы, землетрясения, наводнения, пожары, град, геомагнитные бури. Каждое из названных бедствий может привести к выходу из строя оборудования открытого

распределительного устройства (ОРУ) подстанции, разрушению подстанции, созданию ненормальных режимов работы оборудования.

Относительно новым стихийным бедствием являются геомагнитные бури. Рассмотрим их процесс возникновения и влияния на СЭС.

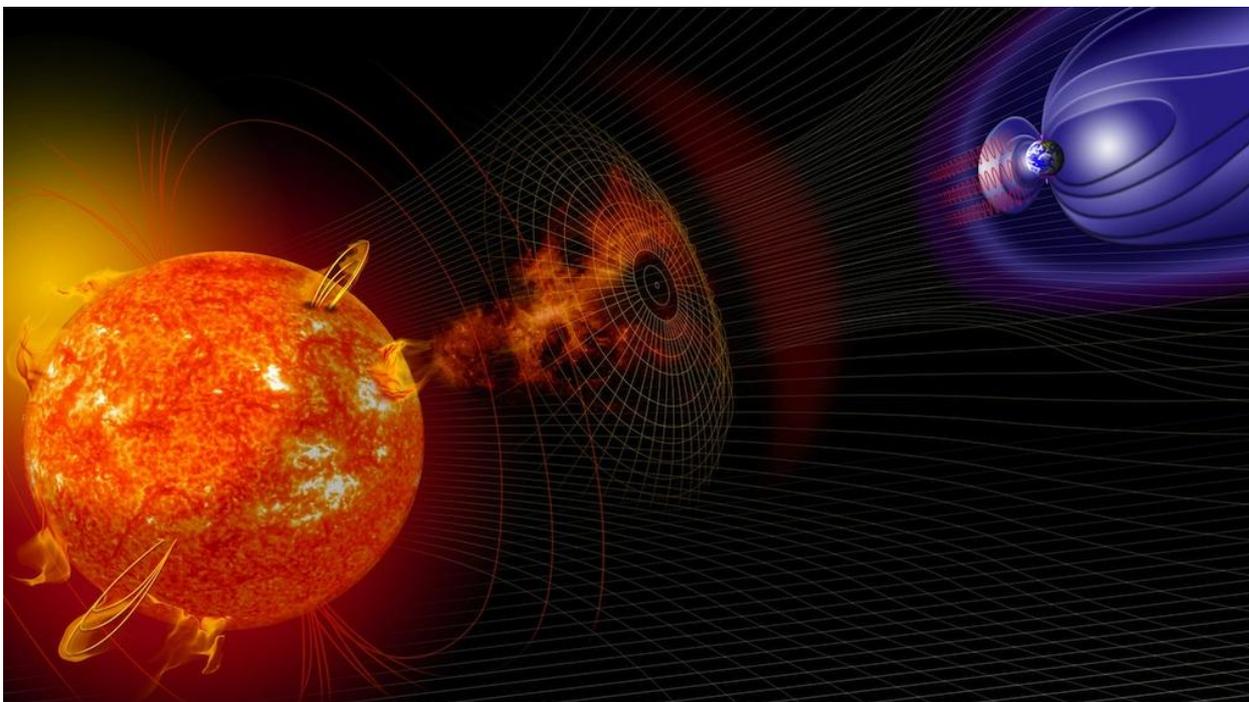


Рисунок 1 – Процесс взаимодействия потоков солнечного ветра с магнитосферой Земли

Геомагнитную бурю вызывают возмущенные потоки солнечного ветра, которые, взаимодействуя с ионосферой нашей планеты (рисунок 1), индуцируют на поверхности Земли медленно меняющееся электрическое поле, которое наводит ЭДС между заземлёнными нейтралями силовых трансформаторов СЭС. Значение этого ЭДС на протяженных линиях электропередач (ЛЭП), свыше 300 км, может достигать нескольких киловольт, которое, в свою очередь, вызывает протекание по ЛЭП геоиндуцированных токов, которые по отношению к частоте питающей сети 50 Гц, являются постоянными (рисунок 2). В силовых трансформаторах эти токи вызывают насыщение магнитной системы, вследствие чего увеличиваются

несинусоидальные намагничивающие токи, протекающие в сети. Таким образом, в СЭС начинают протекать высшие гармоники напряжения и тока, увеличивается потребление реактивной мощности, и пропускная способность сети снижается, происходит падение напряжения, также возможны ложные срабатывания РЗА, и, как следствие, нарушение нормальной работы потребителей.

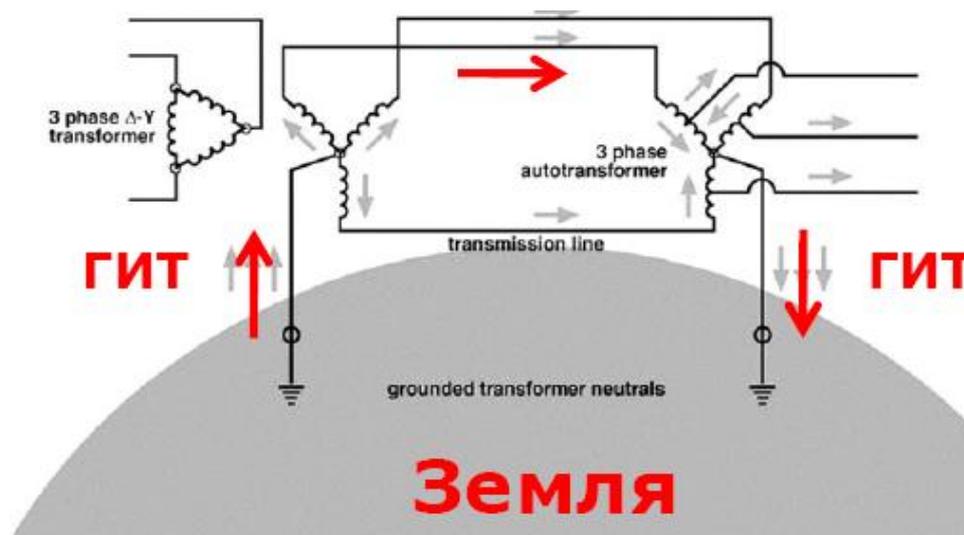


Рисунок 2 – Протекание постоянных токов через заземленные нейтралы силовых трансформаторов

В качестве примеров выхода из строя оборудования СЭС можно привести отключения в Дании (2003 г.), ЮАР (2003 г.), Англия (1989 г.), Финляндии (1982, 1986 г.г.), Швеции (1982, 1986, 1991, 2003 г.г.), США и Канады (1958, 1980, 1989, 1991, 1994, 2003 г.г.). Самой крупной аварией в электрических сетях XX века считается авария 13 марта 1989 года в Канадской провинции Квебек. В результате этой аварии электричество отсутствовало 9 часов, а её последствия устранялись несколько недель. В ходе расследования было установлено, что причиной аварии является значительное увеличение постоянных токов, в результате усиленного возмущенного потока солнечного ветра во время магнитной бури. Из-за увеличения постоянных токов, протекающих через

нулевые провода глухозаземленных силовых трансформаторов, в последних увеличились протекающие гармоники, что привело к перегреву частей трансформаторов, их пробое и выходу из строя (рисунок 3).

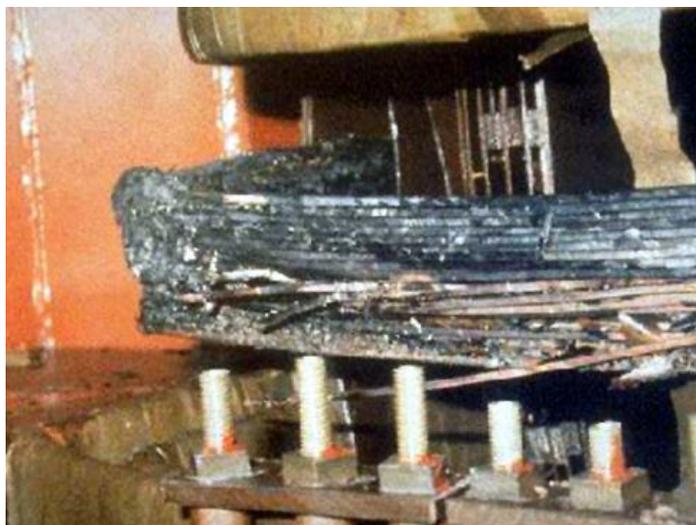


Рисунок 3 – Последствия воздействия постоянных токов на силовой трансформатор

В России данной проблемой стали заниматься относительно недавно. К слову, мониторинг постоянных токов в России сегодня осуществляется лишь на Кольском полуострове в рамках европейского проекта EURISGIC. Ко всему прочему, провести эксперимент на действующей подстанции не представляется возможным, так как стоимость оборудования подстанции достаточно высока, в случае выхода из строя силового трансформатора подстанция начинает работать в ненормальном режиме, также составляет сложность генерирование постоянных токов. Поэтому для исследования постоянных токов пользуются математическим моделированием, позволяющем приблизительно определить степень влияния постоянных токов на СЭС, последствия такого воздействия, меры по предотвращению протекания постоянных токов в СЭС. В нашей стране большой вклад в исследование и моделирование процессов влияния

постоянных токов на СЭС сделали Вахнина В.В. и Кувшинов А.А., Сушко В.А. и Косых Д.А.

Как стало понятно, наибольшее влияние постоянных токов происходит на силовые трансформаторы с глухозаземленной нейтралью. Необходимо учитывать, что силовые трансформаторы являются одним из основных элементов СЭС. Вывод его из строя может привести к отключению большого количества потребителей, что является неприемлемым действием. Следовательно, необходимо определить степень влияния постоянных токов на силовые трансформаторы, во избежание их выходов из строя.

Целью работы является разработка методики расчета токов намагничивания в силовых трансформаторах систем электроснабжения.

Согласно указанной цели были поставлены для решения следующие задачи:

1. Анализ негативного воздействия постоянных токов при геомагнитных бурях на силовые трансформаторы систем электроснабжения.
2. Разработка математической модели силового трансформатора с учётом конструкции магнитной системы.
3. Анализ токов намагничивания с учётом типа силового трансформатора.

# **1 Анализ негативного воздействия постоянного тока на силовые трансформаторы систем электроснабжения**

## **1.1 Процессы на солнце**

### **1.1.1 Солнце**

Солнце - это звезда нашей Солнечной системы, вокруг неё вращаются планеты и другие объекты (рисунок 4). По отношению ко всей Солнечной системе, Солнце обладает массой примерно 99,87% от неё, на основании чего можно смело утверждать, что Солнце имеет титанический размер. Жизнь на нашей планете поддерживают свет и тепло, полученные от Солнца. Также оно непосредственно влияет на планетарный климат. Солнце состоит из водорода (~73 % от массы и ~92 % от объёма), гелия (~25 % от массы и ~7 % от объёма) и других, входящих в его состав элементов: железа, никеля, кислорода, азота, кремния, серы, магния, углерода, неона, кальция и хрома. На поверхности Солнца, температура составляет примерно 5800 К, отчего оно излучает белый свет, но так как происходит сильное рассеяние и поглощение части спектра атмосферой Земли, прямой свет Солнца у поверхности нашей планеты приобретает жёлтоватый оттенок [26].

Расстояние между Солнцем и центром нашей галактики составляет около 26 тысяч световых лет. Вращаясь, полный оборот Солнце вокруг Млечного пути осуществляет более чем за 200 миллионов лет.

Вырабатывание энергии на Солнце происходит посредством термоядерного синтеза гелия из водорода. Мощность солнечного излучения устанавливается солнечной постоянной. Солнечная постоянная - величина количества энергии, которая проходит через площадь единичной площади, которая, в свою очередь, перпендикулярна солнечным лучам. На орбите нашей планеты величина этой постоянной равна примерно 1370 Вт/м<sup>2</sup>.

Потери солнечного излучения на подходе к земной поверхности составляют примерно  $370 \text{ Вт/м}^2$  (27% от всего излучения) и это ещё с условием, что на Земле полдень и ясная погода. Неким щитом нашей планеты, в котором теряется 27% солнечного излучения, является её атмосфера. Энергия, которая всё-таки достигла поверхности Земли, используется в различных естественных и искусственных процессах. К примеру, растения благодаря фотосинтезу перерабатывают энергию в химическую форму. Солнечную энергию также используют для производства электрической энергии. Используют для этого специальные фотоэлементы, либо пользуются методом прямого нагрева носителя энергии (воды) [63].

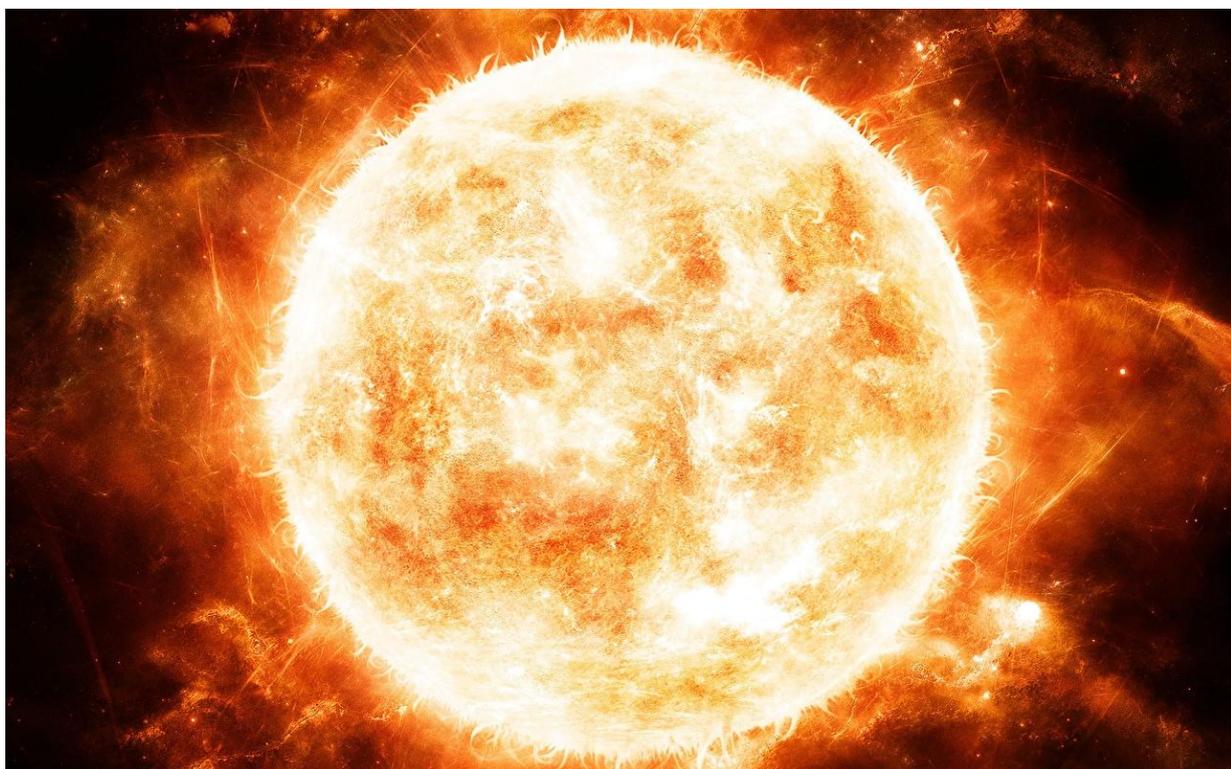


Рисунок 4 – Звезда по имени Солнце

Солнце является магнитно-активной звездой. Оно имеет огромное магнитное поле, напряжённость которого изменяется со временем, и которое меняет направление примерно каждые 11 лет. Разновидность магнитного поля Солнца вызывает различные явления: пятна на Солнце, вспышки, солнечный

ветер, протуберанцы. На Земле же, под влиянием этих явлений происходят геомагнитные бури, негативно влияющих на работу различных средств связи, объекты сетевых организаций, а также очень плохо воздействует на живые организмы, в частности, у людей может начаться головная боль и ухудшиться самочувствие.

На Солнце очень часто происходят процессы, скрывающие в себе опасность для всего живого и не только в нашей системе. Разберём конкретные явления, возникающие на солнце, и влияющие на Землю [27].

### **1.1.2 Солнечные вспышки**

Солнечная вспышка – процесс, который происходит в атмосфере Солнца, и при котором высвобождается огромное количество энергии. Солнечные вспышки происходят по всему объёму Солнца, в фотосфере, хромосфере и короне. Стоит сразу определить такой момент, что корональные выбросы и солнечные вспышки – это абсолютно разные процессы, протекающие на Солнце, к тому же не зависят друг от друга. От одной очень крупной солнечной вспышки в космическое пространство выбрасывается около  $6 \cdot 10^{25}$  Дж. Данное значение многие исследователи приравнивают к 17 % от всего энерговыделения Солнца за 1 секунду. Если данную величину энергии перевести в электрическую энергию, то человечество будет потреблять эту величину электроэнергии примерно 1000000 лет.

Импульс солнечных вспышек имеет протяженность всего лишь несколько минут, однако, если пересчитать энергию уже в тротиловом эквиваленте, то выделяется примерно 1000000000 мегатонн. Для того, чтобы приблизительно рассчитать сколько энергии выделилось в результате солнечной вспышки, необходимо площадь свечения в линии излучения водорода умножить на яркость этого свечения, которая связана с мощностью источника [41].

Стоит упомянуть, что только с момента запуска советского аппарата «Спутник–2» появилась возможность регистрировать рентгеновское излучение Солнца [62].

Чтобы увидеть различные процессы в солнечных вспышках необходимо проводить измерения для разных длин волн. Поэтому корреляция между двумя индексами вспышечной активности существует только в статистическом смысле, так для отдельных событий один индекс может быть высоким, а второй низким и наоборот.

Вспышки на Солнце обычно возникают в местах, где магнитное поле наиболее нейтрально, относительно окружающих пятен, которые имеют северную и южную полярность. Солнечные вспышки происходят с различной периодичностью, которая зависит от цикла Солнца на данный момент.

Главным фактором, который отвечает за создание ионосферы являются тяжелые ультрафиолетовое и рентгеновское излучения вспышек. Эти излучения могут серьёзно изменять свойства верхней атмосферы: плотность её существенно увеличивается.

Плазменные облака, выбрасываемые во время вспышек приводят к возникновению геомагнитных бурь, которые определённым образом влияют на технику и биологические объекты.

Для прогнозирования солнечных вспышек необходимо проводить анализ магнитных полей Солнца. Это довольно таки сложно, так как структура, из которой состоит Солнце неустойчива настолько, что заниматься прогнозированием солнечной вспышки даже за неделю является бесполезной тратой времени. Американское космическое агентство прогнозирует на очень малый срок 1 - 3 дня. Когда на Солнце относительно спокойные дни, то вероятность крупной вспышки обычно находится в диапазоне 1-5 %. В активные же периоды вероятность может возрасти до 30-40 %.

### 1.1.3 Корональный выброс массы

Корональный выброс массы - выброс вещества из солнечной короны. Наблюдать с Земли корональный выброс массы практически невозможно. Самые первые кадры с корональными выбросами массы в наблюдаемом диапазоне были сделаны с помощью коронографа в 1977 году, который был установлен в космосе на орбитальной солнечной обсерватории. Космическая станция СММ продолжила изучение этого явления только лишь в 1980 году.

Никто из видных учёных и представить себе не мог, что корональные выбросы массы происходят на Солнце и являются очень важными. Всё изменилось с появлением двух вышеназванных станций наблюдения [42].

Однако существует и недостаток наблюдения за корональным выбросом массы, мы не можем увидеть источник этого выброса. Это происходит потому, что затмевающий диск коронографа как бы закрывает собой Солнце. Соответственно мы можем только предполагать, что же является источником коронального выброса массы? Всевозможные предположения о возможных источниках выброса делаются на основе наблюдений другими приборами в других диапазонах волн. Эта заминка приводит к тому, что наблюдая за выбросом с орбиты Земли со спутника, мы не можем определить направление его движения. Чтобы одолеть данную трудность, были собраны и запущены два космических аппарата называемых STEREO, которые находятся на разных полюсах орбиты Земли.

У коронального выброса массы существует небольшое различие с солнечной вспышкой. У выброса, энергия, которая накопилась в частях Солнца, распределяется на ускорение большого числа масс вещества. У солнечной же вспышки магнитная энергия расходуется на электромагнитное излучение. Также очень часто многие путают корональные выбросы массы, которые можно наблюдать только вне солнечного диска, с солнечными вспышками, которые можно наблюдать только на солнечном диске. Так как сопоставить два

таких совершенно разных явления невозможно, то приняли две точки зрения на эти солнечные явления [61].

Первая точка зрения говорит нам о том, что корональные выбросы массы и солнечные вспышки – это разные проявления одного и того же процесса. Вторая точка зрения говорит нам о том, что у этих явлений один и тот же источник. В этом случае, если в активной части Солнца Энергии более чем достаточно, то возможно наблюдение обоих этих явлений рядом во временном интервале. Впрочем, имеются множества наблюдений, когда корональные выбросы массы происходят без каких либо явлений на солнечном диске, в том числе и без солнечных вспышек.

Корональный выброс массы состоит из плазмы, которая состоит из электронов и протонов наряду с малым количеством более тяжёлых элементов - гелия, кислорода, и других.

Характерной особенностью выброса является то, что общая топология выброса обладает формой гигантской петли, оба или одно основание которой закреплены за солнечную атмосферу. В каждом корональном выбросе массы может содержаться до 10 миллиардов тонн вещества, которое летит в космосе со средней скоростью 400 км в секунду и достигает Земли в течение одного-трёх дней [43].

#### **1.1.4 Протуберанцы**

Протуберанцы - плотные конденсации частично холодного вещества, которые поднимаются и удерживаются над солнечной поверхностью его магнитным полем.

Структурно протуберанцы состоят из волокнистых и клочковатых частей, которые всегда находятся в движении и очень напоминают на нити и комки плазмы всевозможных форм. Подразделяются протуберанцы по двум признакам: морфологическому и динамическому.

Химический состав протуберанцев практически аналогичен составу поверхности Солнца, впрочем, физические условия такого рода, что в спектре спокойных протуберанцев доминируют линии водорода, а также ионизированный кальций. В протуберанцах, у которых присутствует связь с солнечными пятнами, выделяют присутствие разнородных металлов. На основании ширины, интенсивности и других свойств данных линий можно сделать вывод, что для протуберанцев характерны температуры 6-8 тыс. К при концентрации частиц  $(1-5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Продолжительное существование протуберанцев указывает на то, что его вещество удерживают магнитные силы. Спектроскопическими наблюдениями установлено, что магнитные поля существуют в протуберанцах напряжённостью в несколько сотен эрстед [31].

Классифицировать протуберанцев по внешнему виду, скорости и особенностям движения вещества внутри него можно по следующим критериям:

- спокойные;
- активные;
- эруптивные или изверженные;
- корональные или петлеобразные.

Спокойные - движение веществ и изменение формы происходит в них довольно таки медленно. Время существования может затянуться на недели, и даже месяцы. Данный вид протуберанцев наблюдаются во всех гелиографических широтах. Возникновение данного вида происходит либо в отдалении от групп солнечных пятен, либо рядом с ними на поздних стадиях их развития [37]. Кинетическая температура -  $15000^\circ\text{C}$ .

Активные – у данного типа происходят довольно таки быстрые движения потоков вещества от протуберанца к фотосфере и от одного протуберанца к другому. Значительное количество спокойных протуберанцев также переживают активную стадию, которая может длиться от нескольких десятков минут до нескольких суток, которая заканчивается либо полным

исчезновением, либо превращением его в эруптивный протуберанец. Кинетическая температура - 25000°C.

Эруптивные - по виду напоминают колоссальные фонтаны, которые достигают высоты до 1700000 км над поверхностью Солнца. Процесс движения массы вещества там происходит быстро. Их выкидывает с большими скоростями, которые могут достигать несколько сотен км/с и которые, в свою очередь, довольно таки быстро изменяют свои очертания. При достижении большой высоты протуберанец ослабевает и рассеивается. У части протуберанцев иногда происходили довольно резкие изменения скорости движения отдельных сгустков массы. Продолжительность жизни эруптивных протуберанцев очень мала [44].

Корональные - образуются над хромосферой, и очень похожи на маленькие облака, затем сливаются в одно большое облако, из которого отдельными струями вниз к хромосфере спускаются потоки светящегося вещества. Продолжительность данного протуберанца составляет несколько часов. Крупные протуберанцы и активные корональные выбросы достаточно редки, они случаются значительно чаще вблизи максимума 11-летнего солнечного цикла активности, когда наблюдается много различных пятен и других активных явлений.

Следующая классификация протуберанцев, учитывает характер движения материи в них и форму протуберанцев:

I тип (редко встречающийся) имеет форму облака или струи дыма (рисунок 5). Развиваться начинает от основания, затем вещество поднимается по спирали на большие высоты. Скорость движения вещества может достигать 700 км/с. На высоте около 100 тыс. км от протуберанца отделяются куски, которые затем падают обратно по траекториям, напоминающим силовые линии магнитного поля.



Рисунок 5 – Протуберанец I-го типа

II тип обладает формой искривлённых струй, которые начинаются и кончаются на поверхности Солнца (рисунок 6). Движение узлов и струй происходит как бы по магнитным силовым линиям. Скорость движения сгустков может варьироваться от нескольких десятков до 100 км/с. На высотах в несколько сотен тысяч км струи и сгустки угасают [45].

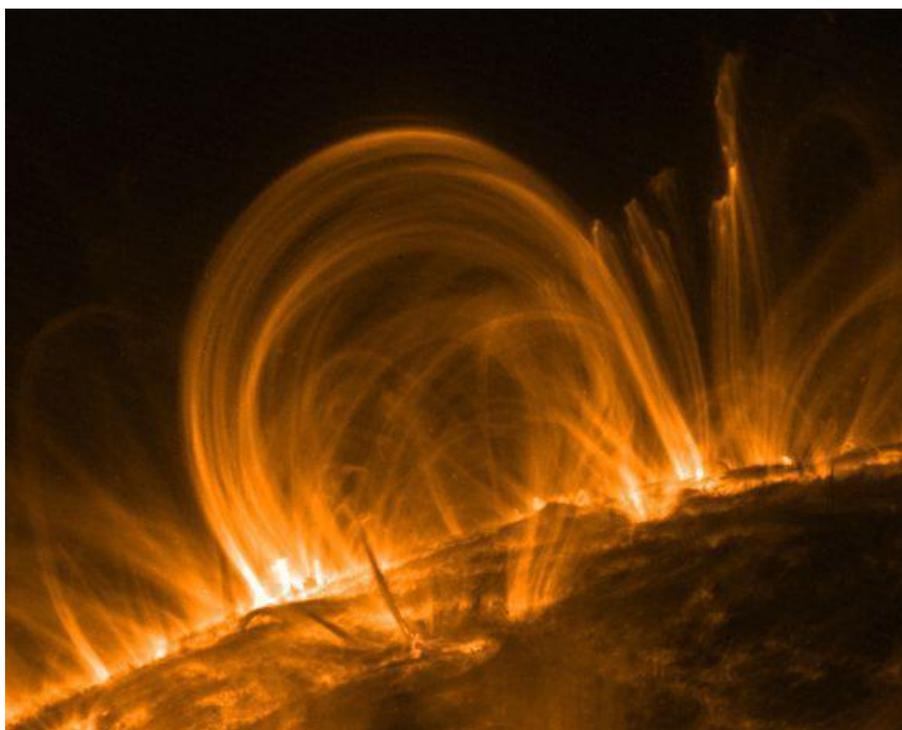


Рисунок 6 – Протуберанец II -го типа

III тип по виду напоминает кустарник или дерево (рисунок 7). Достигает громадных размеров. Движения комков неупорядочены.



Рисунок 7 – Протуберанец III -го типа

Полной теории, которая способна объяснить различные явления, связанные с солнечными протуберанцами, ещё нет. Очевидно, что, помимо силы тяжести, тут играют большую роль электрические и магнитные силы [32].

### 1.1.5 Солнечные пятна

Солнечные пятна - области, находящиеся на поверхности Солнца, имеющие также ярко выраженный тёмный цвет с температурой ниже окружающих участков фотосферы примерно на 1500 К (рисунок 8). Увидеть данные пятна можно на Солнце в отдельных случаях даже невооруженным глазом, но чаще приходится использовать оптические приборы. Через солнечные пятна происходит процесс выхода сильных магнитных полей в фотосферу. Пятна, возникающие в фотосфере, имеют тёмный цвет в связи с тем, что конвективное движение веществ, которое переносит тепловую энергию, понижается из-за влияния сильных магнитных полей.



Рисунок 8 – Солнечные пятна

Результатом возникших возмущений являются тёмные пятна на некоторых участках поверхности Солнца. Возникает данный процесс следующим образом, через фотосферу «проскакивает» пучок магнитных линий, который, попадая в область короны, замедляет конвекционное движение плазмы в грануляционных ячейках, что, в свою очередь, препятствует переносу энергии в данных местах из внутренних областей наружу. В первую очередь в данном месте возникает некое подобие факела, затем - маленькая точка, которая называется пора, имеющая размер несколько тысяч километров. Величина магнитной индукции с начального значения где-то 0,1 Тл начинает расти, и данный процесс продолжается несколько часов, соответственно размер пятен и количество пор увеличивается. Затем происходит процесс слияния нескольких пятен друг с другом, и формируются одно или несколько штук. Максимальная величина магнитной индукции может достигнуть 0,4 Тл, но только в период наибольшей активности пятен [33].

Существовать солнечные пятна могут несколько месяцев, таким образом, некоторые пятна можно наблюдать в течение нескольких оборотов Солнца вокруг себя. Именно на основании данного факта (движение наблюдаемых пятен вдоль солнечного диска) было доказано, что Солнце вращается вокруг своей оси, а также проведены первые измерения периода обращения.

Чаще всего солнечные пятна формируются группами, тем не менее, порой может возникнуть одиночное пятно, которое проживет всего лишь несколько дней. Или же могут возникнуть два пятна, с сонаправленными друг в друга магнитными линиями. Сгруппированные пятна постоянно вытягиваются параллельно солнечному экватору.

Дольше двух дней проживает не больше половины пятен, и лишь десятая часть переживает 11-дневный порог

Средняя температура поверхности Солнца около 6000 °С (эффективная температура - 5770 К, температура излучения - 6050 К). Как бы то ни было странным, температура солнечного пятна снижается при приближении к его центру. Центр пятна имеет температуру около 4000 °С, наружные области

пятен, граничащие с нормальной поверхностью, - от 5000 до 5500 °С. Вещество солнечного пятна излучает свет, даже невзирая на то, что температура этих самих пятен ниже, хотя и в гораздо меньшей степени, чем остальная поверхность. На самом деле солнечные пятна, какими бы они черными не казались, тоже светятся из-за разницы температуры центра пятна и его краев, но их яркость просто теряется на фоне Солнца.

Пятна - области наибольшей активности на Солнце. Если количество пятен велико, то возможно такое развитие ситуации, при котором произойдет пересоединение магнитных линий. В этом случае те линии, которые проходят внутри одной группы пятен, рекомбинируют с линиями из другой группы пятен, имеющими противоположную полярность. Результатом данного процесса, который мы можем наблюдать, является солнечная вспышка. Достигнув Земли, импульс излучения вызовет мощные возмущения её магнитного поля. При этом произойдет нарушение в работе спутников и окажется приличное влияние на объекты, которые расположены на Земле. Именно по причине того, что происходит нарушение магнитного поля, в низких географических широтах Земли увеличиваются шансы возникновения северных сияний. Ионосфера нашей планеты тоже подвержена флуктуациям солнечной активности, это проявляется в изменении распространения коротких радиоволн.

Появление солнечных пятен, срок их жизни и активность тесно связаны с циклом Солнца. Один солнечный цикл составляет примерно 11 лет. В периоды минимума активности Солнца пятен мало или они вообще отсутствуют, и наоборот, в периоды максимума их может наблюдаться несколько сотен [34].

### **1.1.6 Солнечный ветер**

Солнечный ветер - поток ионизированных частиц, который истекает из солнечной короны со скоростью 300-1200 км/с в окружающее Солнце космическое пространство (рисунок 10).

Довольно таки большое количество природных явлений связывается с солнечным ветром, в их число входят магнитные бури и полярные сияния (рисунок 9).



Рисунок 9 – Северное сияние

Каждую секунду Солнце по причине солнечного ветра теряет примерно один миллион тонн вещества. Состав солнечного ветра можно условно разделить на две части: в первую входят электроны, протоны и ядра гелия (альфа-частиц), во вторую входят ядра других элементов и неионизированных частиц, содержание которых в составе ветра очень мало [46].

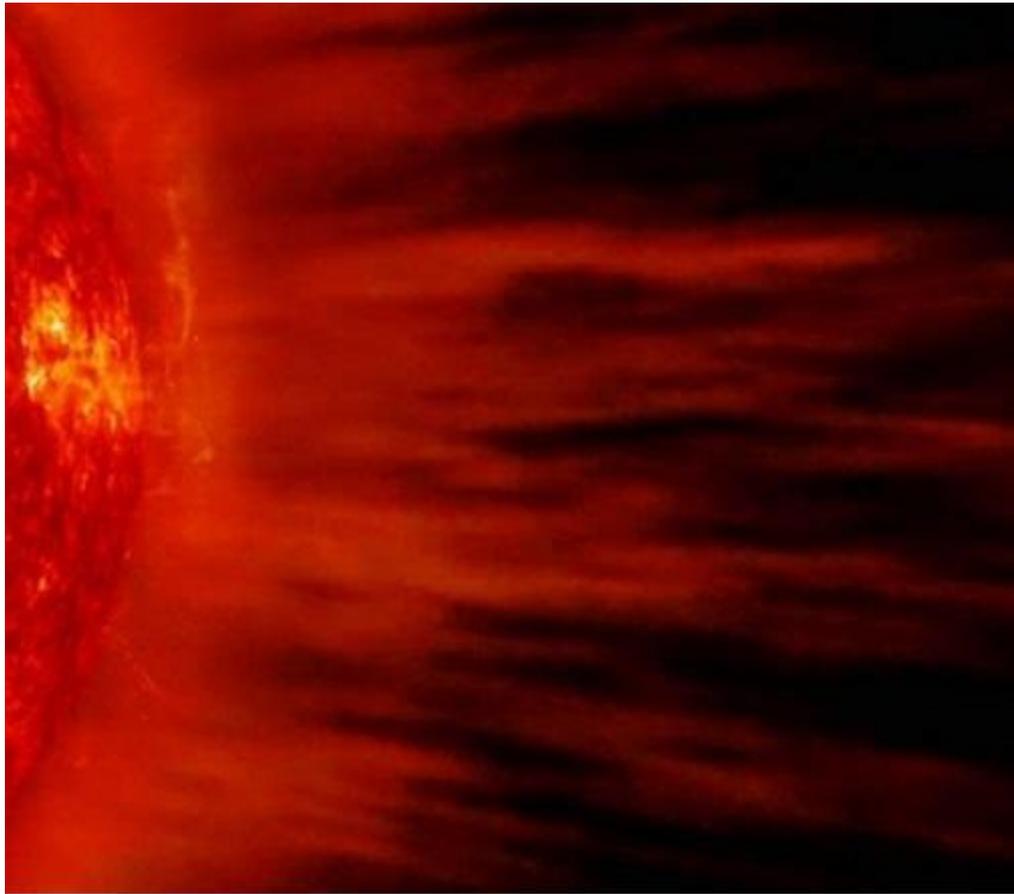


Рисунок 10 – Солнечный ветер

Несмотря на то, что солнечный ветер исходит из внешнего слоя Солнца, он не отражает реального состава элементов в этом слое, потому что в результате процессов дифференциации содержание некоторых элементов увеличивается, а некоторых - уменьшается.

Изменение активности Солнца напрямую влияет на интенсивность солнечного ветра. Если сравнивать по скорости, то потоки солнечного ветра можно поделить на следующие два класса: медленные (примерно 300-400 км/с около орбиты Земли), быстрые (600-700 км/с около орбиты Земли) и спорадические высокоскоростные (до 1200 км/с).

В Солнечную систему извне может проникнуть межзвёздный газ. Щитом нашей системы является как раз солнечный ветер, который образует гелиосферу, защищающую нас от этого межзвездного газа. Излучение этого газа очень сильно ослабляет магнитное поле солнечного ветра. Так, например, в

2009 году, интенсивность излучения вблизи Земли выросла на 19 % в период длительного минимума солнечной активности, относительно всех наблюдаемых ранее максимумов [35].

На других планетах Солнечной системы, которые обладают магнитным полем, солнечный ветер порождает такие явления, как полярные сияния и радиационные пояса планет.

Неоднородность потоков солнечного ветра (вдали от планет) порождает межпланетное магнитное поле.

## **1.2 Влияние геомагнитных бурь на Землю**

### **1.2.1 Влияние постоянных токов на силовые трансформаторы систем электроснабжения**

Первые воздействия геомагнитных бурь (ГМБ) на силовые трансформаторы (СТ) систем электроснабжения были зафиксированы в 1940 году. Как уже было сказано, постоянные токи возникают между глухозаземлёнными нейтралями силовых трансформаторов, вследствие взаимодействия магнитного поля Земли и возмущенных потоков солнечного ветра. На рисунке 11 показан пример возникновения постоянного тока между глухозаземленными нейтралями силовых трансформаторов и протекание их в СЭС [4].

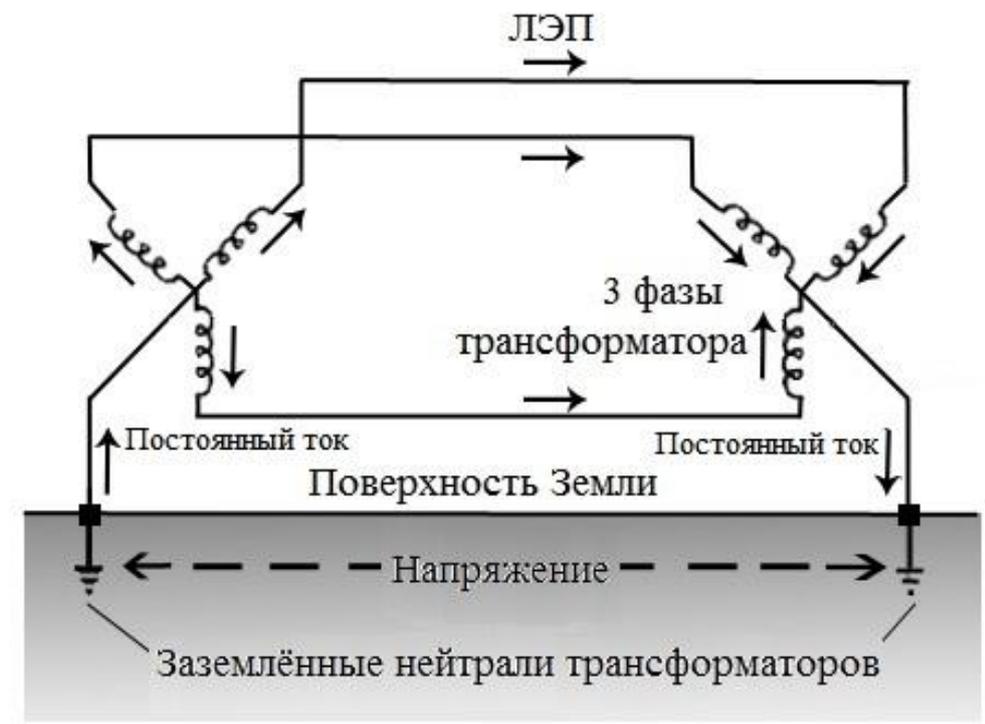


Рисунок 11 – Схема протекания постоянных токов через силовые трансформаторы

Силовые трансформаторы являются неотъемлемой частью систем электроснабжения. Как было уже сказано выше, постоянный ток проникают в сеть через глухозаземленную нейтраль. Данный вид нейтрали используется на СТ напряжением выше 110 кВ. Таким образом, в случае негативного влияния постоянного тока на такие СТ, под угрозой отключения оказывается большое количество потребителей электрической энергии [5].

На силовой трансформатор постоянный ток влияют через ток намагничивания, увеличение которого вызывает насыщение магнитной системы данного СТ. Также при возникновении постоянного тока в глухозаземлённых нейтралях СТ происходит увеличение протекания гармоник, которые, в свою очередь, замыкаясь на корпусе силового трансформатора приводят к перегреву различных его частей и последующему их пробою.

Но также стоит заметить, что силовые трансформаторы подразделяются на однофазные броневые, трехфазные стержневые, трёхфазные

бронестержневые, и на СТ различной конструкции ГМБ определенной интенсивности будет влиять по-разному [36].

### **1.2.2 Примеры различных аварий в системах электроснабжения**

С развитием человечества увеличивается и потребность в ресурсах, поэтому не удивительно, что происходят аварии на различных электростанциях, подстанциях, сетях, ведь с каждым годом электрические сети всё усложняются и усложняются. Количество значительных аварий в различных системах электроснабжения на Земле за последние лет десять неумолимо растёт. По существующей статистике СИГРЭ, количество аварийных ситуаций в Северной Америке на различных объектах электрических сетей, с отключением мощности 1000 – 3000 МВт, за последние 25 лет составило около 20. Максимальная мощность, которая была отключена в результате аварии составила 30000 МВт.

Приведем примеры серьёзных системных аварий, произошедших за границей и принесшие довольно таки крупный ущерб потребителям в том числе, денежные потери [47].

Также примеры пожара силового трансформатора, последствия системных аварий и поврежденные обмотки силового трансформатора показаны на рисунках 12, 13, 14, соответственно.



Рисунок 12 – Пожар силового трансформатора

Авария на электрической станции в 2001 г. в Северной Индии оставила без электроснабжения более 210 млн. человек. В том же 2001 г. на западном побережье Соединенных Штатов Америки в штате Калифорния авария в системе оставила без электроснабжения около 1 млн. человек. Падение всего лишь одной опоры ВЛ в африканской Нигерии привело к отключению, по различным данным, от 30 до 50 млн. человек.

В 2003 году произошла авария, которая привела к отключению рекордно большой мощности в Северной Америке – 61,8 ГВт. Без электричества в сумме остались 50 млн. человек, проживающих в Канаде и Америке. Общий ущерб составил примерно 10-11 млн. долларов США.



Рисунок 13 – Последствия системных аварий

Вышедший из строя генератор электрической станции, имеющий мощность 300 МВт, в 2004 г. в Греции привёл к отключению потребителей на 2000 МВт. В 2005 г. в Швейцарии проводили разделение электрической сети в районе Женевского озера, из-за аварии полмиллиона жителей остались без электрической энергии на 3 часа. В том же году уже в нашей стране в центральных регионах: Рязанской, Калужской, Московской, Смоленской и Тульской областей произошла авария, приведшая к отключению потребителей мощностью больше 3500 МВт, финансовые потери составили 1,7 млрд. дол.



Рисунок 14 – Поврежденные обмотки силового трансформатора

В Германии в 2006 г. произошло разделение сети UCTE, мощность отключенных электрических станций составила 274 ГВт. Причиной данной аварии послужило всего лишь отключение нескольких линий электропередач. В том же году такая же авария, но уже в Токио послужила причиной к отключению 1,4 млн. потребителей на 3 часа. И такая же авария в Новой Зеландии, только уже одной линии привело к отключению около 750 тыс. человек. В 2012 году большая авария электрической сети Индии привела к тому, что на пол дня без электричества остались 19 штатов, а это примерно 600 млн. человек.

Проанализировав большую часть различных аварий в электрических сетях, можно сделать вывод, что основными причинами их возникновения являются:

1. Выход из строя электрооборудования СЭС;
2. Отсутствие или нехватка резерва мощностей;
3. Малая пропускная способность электрических сетей;
4. Нарушение работы релейной защиты и противоаварийной автоматики;
5. Ошибочные или несогласованные действия оперативного персонала;

6. Обрыв линий электропередач и короткие замыкания в результате падения деревьев;

7. Удары молний в линии электропередач;

8. Гололедные образования;

9. Сильный ветер;

10. Геомагнитные бури.

Геомагнитные бури (ГМБ) являются одной из причин возникновения нарушений функционирования различного электрооборудования, а также возникновения сложных аварий в СЭС [6].

Первое влияние ГМБ на нормальную работу СЭС были зафиксированы в 1940 году. Во время этой бури весной 1940 года в США и Канаде энергокомпании сообщили о том, что в сетях произошли массовые снижения напряжения, колебания реактивной мощности, а также отключения ряда силовых трансформаторов. Поэтому именно с этого времени ведется мониторинг подобных нарушений в тех странах, где электрические сети наиболее развиты и протяжены [40].

Похожие влияния ГМБ произошли в феврале 1958 года на границе США и Канады, в штате Миннесота и Торонто, соответственно. Были зафиксированы аномальные перетоки реактивной мощности, а также одна крупная системная авария. Похожие инциденты происходили и на территории северной Европы, в частности в Швеции в 80-х годах прошлого века произошли отключения 15 линий электропередач, а также 4 силовых трансформаторах, вызванные влиянием ГМБ.

В результате аварии осенью 1965 года в Американских штатах Нью-Джерси, Пенсильвания, Нью-Йорк и Новой Англии, а также в нескольких провинциях Канады без электрической энергии остались 30000000 человек.

Самой крупной системной аварией XX века считается «Ночь страха» произошедшая в Американском Нью-Йорке в середине июля 1977 года. В результате грозы в линию электропередачи попала молния. Вследствие этого без электрической энергии остались 10 млн. жителей на 25 часов. Особой эта

авария считается также потому, что накануне аварии город пребывал в некотором кризисе. Во время этих 25 часов на кварталы состоятельных граждан напали банды грабителей и мародёров. Ущерб от этой аварии составил примерно 1 миллиард долларов.

Самой крупной аварией в истории наблюдения за влиянием ГМБ на СЭС считается авария в Канадской провинции Квебек, которая произошла в ночь с 13 на 14 марта 1989 года. Тогда этот инцидент на 9 часов обесточил 6 млн. человек, отключив часть силовых трансформаторов и несколько линий электропередач. В это же самое время на территориях Британских островов и Швеции под влиянием этой же самой ГМБ отключилась часть силовых трансформаторов и линий электропередач.

Также весной 1991 года в Швеции были зафиксированы понижения напряжения, крупные гармоники тока и напряжения, которые привели к отключению одного силового трансформатора и 9 линий электропередач.

На постсоветском пространстве самой «аварийной» страной является Грузия. В начале мая 1993 года вся территория Грузии в результате не установленных причин осталась без электрической энергии. К счастью, в этот раз через 40 минут резервные генераторы стали подавать электроэнергию на жизненно важные объекты и в Тбилисское метро.

Через полтора года, в середине ноября 1994 года произошло сразу две аварии, на Тбилисской ГРЭС и Ингурской ГЭС. Сложилась такая тяжёлая ситуация в промышленности страны, что хлеб распространялся среди населения по карточкам.

На Рождество 1995 года население Восточной Грузии осталось без электрической энергии. Поводом послужила авария на Тбилисской ГРЭС. Телефонная связь была недоступна по всей стране.

В столице Великобритании – Лондоне 5 апреля 1996 года без электрической энергии остался метрополитен.

11 августа 1996 года в северных районах Мексики и некоторых Южных штатах электрическая энергия отсутствовала 10 часов. От отсутствия электричества пострадало 15 млн. человек.

Очередная авария на Лондонской электростанции произошла 23 ноября 1996 года. И опять было парализовано метро. К счастью, в этот раз без пострадавших.

В Американском Сан-Франциско 24 октября 1997 года 250000 жителей лишились электрической энергии на полтора часа из-за обрыва линии электропередачи.

В январе 1998 года в канадских провинциях Квебек и Онтарио прекратилась поставка электрической энергии потребителям. Авария произошла в результате очень холодной погоды и сильного ветра. Последствия аварии коснулись также северные американские штаты. Несколько недель 1 млн. человек жили без электрической энергии.

Нередки также случаи человеческого фактора, как например, в начале декабря 1998 года, когда 1 млн. жителей Сан-Франциско лишились электрической энергии на восемь часов из-за ошибки, допущенной одним работником подстанции.

Очередная авария в Нью-Йорке произошла в начале июля 1999 года. 210000 жителей остались без электрической энергии практически на 20 часов в результате жаркой погоды.

В очередные новогодние праздники в 2001 года вновь без электрической энергии остались 1000000 жителей города и окрестностей Сан-Франциско.

В южной Америке тоже случались различные аварии в системах электроснабжения. Примером может служить авария 25 ноября 2002 года в Аргентинской столице – Буэнос-Айресе. Электрической энергии лишились 2 млн. человек, из-за обрыва линии электропередач.

В Африке также были случаи системных аварий. Всё население Алжира, а это где-то 32 млн. человек остались без электрической энергии из-за аварии на электростанции.

В июле 2003 года около 400000 жителей Испанской Барселоны остались без электрической энергии. Причина довольно таки типична для июля – перерасход энергии.

Очень серьёзная авария произошла в Грузии а августе 2003 года. произошло аварийное отключение Ингуриной ГЭС, которая питала половину страны. Соответственно после этого отключилась вся энергосистема страны. Прекратилось движение вагонов метро, вода перестала подаваться в города, Даже центральная телестанция столицы не вещала 20 минут.

В конце августа 2003 года 25 % Лондона остались без электрической энергии, в результате системной аварии в энергосистеме Великобритании. Эта авария считалась крупнейшей за последние десять лет.

На Скандинавии, а именно в Швеции и Дании в сентябре 2003 года в результате морского шторма произошёл обрыв линии электропередачи. Одни сутки без электрической энергии сидели 5 млн. человек.

Очередная ГМБ в северной Европе, а именно в Швеции и Дании произошла осенью 2003 года. Тогда без электрической энергии остались 5 млн. потребителей на 4 часа.

В начале ноября 2003 года в Южноамериканском Чили произошло отключение электростанции из-за аварии. Электрическая энергия отсутствовала пять часов у 600000 жителей города Сантьяго.

В ноябре 2004 года произошла авария в польской энергосистеме. Без электрической энергии осталось 300000 жителей Варшавы. Пришлось закрыть международный аэропорт в Варшаве. Также от электроснабжения было отключено метро.

В июле 2004 года 6 млн. жителей столицы Греции, города Афин два часа ожидали возобновления поставки электрической энергии.

На ближнем Востоке, в Иордании система электроснабжения страны была отключена 10 августа 2004 года. Около 6 млн. жителей страны на три часа остались без электрической энергии.

Наводнения января 2005 года лишило электрической энергии Канадский Торонто на 13 часов.

В Азии серьёзная авария произошла в столице Японии – Токио. Авария произошла 15 августа 2006 года из-за того, что в кабеле линии электропередачи произошёл обрыв, из-за радения подъёмного крана на эту магистральную линию. Электрическая энергия перестала подаваться в Йокогаму, Кавасаки и в столицу, в Токио. Перерыв электроснабжения составил примерно 30 минут. В результате аварии погасли светофоры на улицах, остановились электрички, встали лифты, отключились домашние электроприборы, остановились карусели токийского «Диснейленда».

Также случались аварии, которые затрагивали, чуть ли не весь континент. В начале ноября 2006 года в Германии при ошибочном срабатывании релейной защиты произошло отключение 380-ми киловольтной линии. Отключения электрической энергии затронули следующие страны европейского континента: Австрия, Германия, Португалия, Марокко, Хорватия, Испания, Франция.

Практически в это же самое время небольшой сбой произошёл в Германии. Отключились две линии электропередачи. Затем система защиты энергосистемы Европы, чтобы не допустить полного отключения сетей, автоматически отключила часть потребителей Германии, Бельгии, Франции, Италии, Испании.

В ноябре 2009 года в Таджикистане произошёл обрыв линии электропередачи. Из-за чего примерно 65 % территории страны остались без электрической энергии. Продолжительность ликвидации аварии составила полтора часа.

Очередная авария в Южной Америке затронула сразу два государства: Бразилию и Уругвай. Произошёл очередной обрыв ЛЭП, что сделало невозможным передачу энергии вырабатываемой на ГЭС потребителям. Около 5500000 человек обоих государств лишились электрической энергии на 4 часа.

Не обошли аварии и нашу страну. В конце августа 2010 года произошла аварийная ситуация на одной из подстанций Ленинградской области. Из-за

этого произошло срабатывание релейной защиты, которая в свою очередь, отключила линии электропередачи 330 кВ и автотрансформатор 250 МВА. Одной из версий аварии считается повреждение кабеля вторичных цепей РЗА. В результате без электрической энергии остались большая часть Санкт-Петербурга, а также Ленинградской области.

В начале августа 2012 года произошла серьёзная авария в Индийской энергосистеме. Без электрической энергии остались 19 штатов страны, на которых проживало примерно 650 млн. человек. Перебой в электроснабжении составил 2 дня.

В соседнем Казахстане также не обошлось без аварий. 25 сентября 2012 года в столице страны, Алма-Ате, на подстанции произошло короткое замыкание. Между прочим, короткое замыкание возникло в результате ошибки персонала, который включил заземляющие ножи разъединителя на рабочую сборную шину. Без электрической энергии осталась столица и прилегающие к ней территории.

В конце ноября – начале декабря 2015 года прекратилась подача электрической энергии на территории Крыма с территории Украины. Произошло это из-за ручного подрыва опор. На полуострове были проблемы с электроснабжением до подключения его к энергосистеме России с помощью кабелей через Керченский пролив.

Из последнего стоит отметить обрыв проводов в ноябре 2016 года в Екатеринбурге. Без электрической энергии остались 117 тыс. человек. Перерыв электроснабжения составил 1 сутки.

Исследования, проведенные Американским Космическим Агентством в начале 2010-го года, прогнозировали пик солнечной активности в 2013-2014 годах. Следовательно, можно утверждать, что на данный момент происходит снижения солнечной активности [29].

## 2 Силовые трансформаторы в системах электроснабжения

### 2.1 Принцип действия и их основные конструктивные элементы

#### 2.1.1 Принцип действия

Силовой трансформатор - стационарное устройство с двумя или более обмотками, который посредством электромагнитной индукции преобразует систему переменного напряжения и тока в другую систему переменного напряжения и тока, как правило, различных значений при той же частоте в целях безопасной электроэнергетики без изменения её передаваемой мощности.

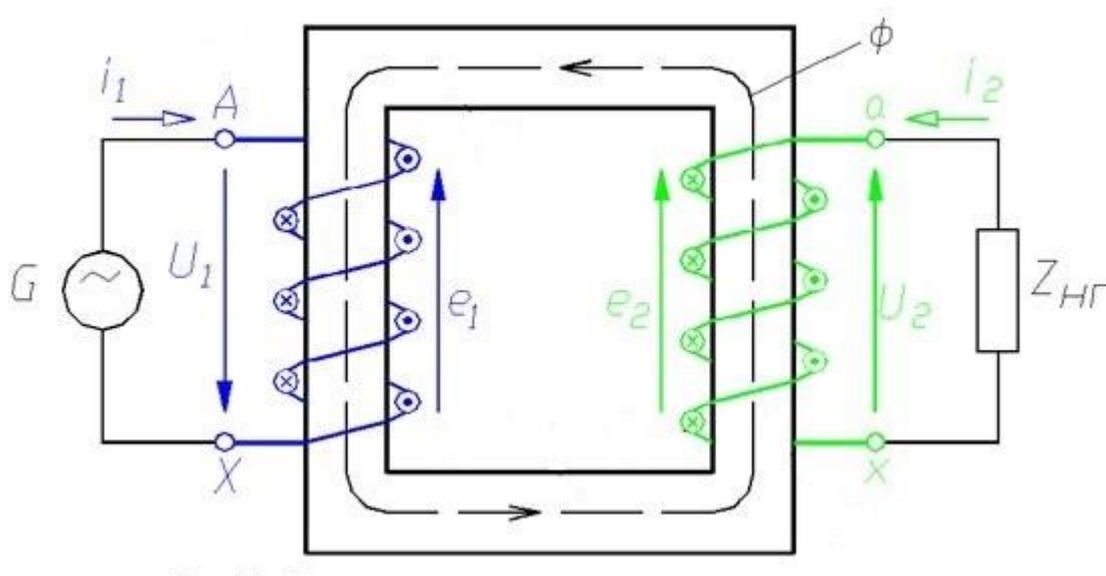


Рисунок 15 – Принцип работы трансформатора

В самом простом случае (рисунок 15) силовой трансформатор имеет одну первичную обмотку, к которой подводится электрическая энергия, и одну вторичную обмотку, от которой энергия отводится к нагрузке. Энергия от одной обмотки к другой передаётся путём электромагнитной индукции. Данное явление можно усилить, для этого необходимо обмотки намотать на замкнутый

ферромагнитный сердечник [7]. При очень больших частотах, порядка 1000000 Гц и выше потери на гистерезис и вихревые токи в таком сердечнике становятся чрезвычайно большими, и тогда приходится применять силовые трансформаторы без ферромагнитного сердечника.

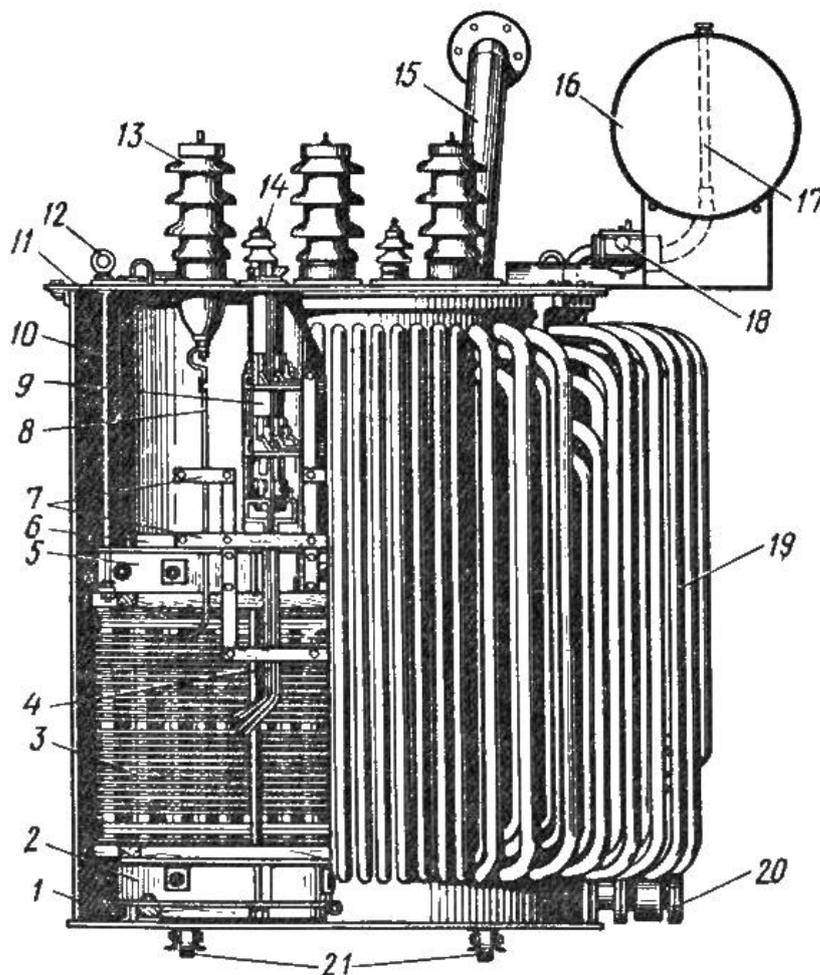


Рисунок - 16 Трехфазный силовой трансформатор мощностью 1000 кВ•А с масляным охлаждением:

1 - бак; 2, 5 - нижняя и верхняя ярмовые балки; 3 - обмотка ВН; 4 - регулировочные отводы; 6 - магнитопровод; 7 - деревянные планки; 8 - отвод от обмотки ВН; 9 - переключатель; 10 - подъемная шпилька; 11 - крышка; 12 - подъемное кольцо; 13 - ввод ВН; 14 - ввод НН; 15 - выхлопная труба; 16 - расширитель; 17 - маслоуказатель; 18 - газовое реле; 19 - циркуляционные трубы; 20 - маслоспускной кран; 21 - катки

Главной составляющей конструкции силового двухобмоточного трансформатора (рисунок 16) является его активная часть, которая состоит из магнитопровода 6 с расположенными на нем обмотками низшего (НН) и высшего 3 (ВН) напряжений, отводов 8 и переключателя напряжения 9. Магнитопровод 6 трансформатора набирается из листов специальной электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Отдельные части магнитопровода собирают в жесткую конструкцию из трех вертикальных стержней с верхним 5 и нижним 2 ярами с помощью стяжных шпилек и прессующих ярмовых балок, образуя замкнутый контур. Чтобы добиться полной изоляции, листы стали покрывают лаком или теплостойким покрытием на основе жидкого стекла. Ярмовыми балками из швеллеров листы стали магнитопровода плотно опрессовывают при помощи шпилек. Ярмовые балки и шпильки изолируют от активной стали магнитопровода. Активная часть трансформатора помещается в металлический бак, который предохраняет обмотки от повреждений и является резервуаром для трансформаторного масла [48].

### **2.1.2 Виды трансформаторов**

Существует несколько видов силовых трансформаторов, применяющихся на различных объектах:

1. Двухобмоточные. У данных трансформаторов имеется одна первичная и одна вторичная обмотки. Разновидностью двухобмоточного трансформатора является трансформатор с расщепленной обмоткой. У данного трансформатора две обмотки низкого напряжения.

2. Многообмоточные. У данных трансформаторов имеется одна первичная обмотка и несколько вторичных обмоток. Чаще всего встречаются трехобмоточные силовые трансформаторы.

3. Однофазные. Такие трансформаторы применяют при передачи больших мощностей.

4. Трёхфазные. Часто используемый вид силового трансформатора.

5. Измерительные. Трансформаторы тока и напряжения, которые используются для уменьшения величины, соответственно, тока и напряжения, для удобства и безопасности их измерения.

6. Остальные. Выпрямительные, сварочные и т.д.

В зависимости от назначения трансформаторы имеют некоторые особенности конструкции и режимов работы. Самым распространенным и особенно важным видом являются силовые трансформаторы.

Силовые трансформаторы встречаются масляные и сухие. Особенность использования масляных трансформаторов заключается в том, что сердечник с обмотками опускают в бак с трансформаторным маслом, выполняющее одновременно роль электрической изоляции и охлаждающего агента. Впрочем, трансформаторное масло является горючим, поэтому при аварии таких трансформаторов присутствует высокая вероятность возникновения пожара. Следовательно, в общественных и жилых зданиях, а также в ряде других случаев применяются сухие трансформаторы, в состав которых не входит трансформаторное масло, и процесс охлаждения которого происходит с помощью воздуха [49].

### **2.1.3 Магнитопроводы трансформаторов**

По структуре магнитопровод силовых трансформаторов можно разделить на следующие виды:

1. Стержневые.
2. Броневые.

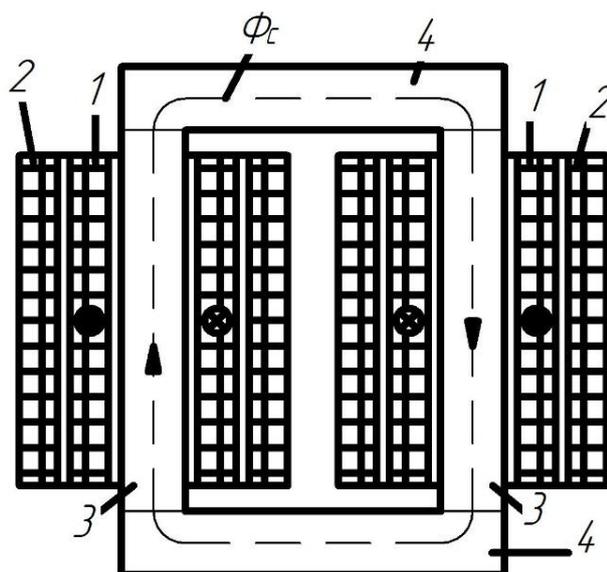


Рисунок 17 – Устройство однофазного стержневого трансформатора:  
 1 – обмотка НН; 2 – обмотка ВН; 3-стержень; 4 – ярмо;  $\Phi_c$  - магнитный поток магнитопровода

Однофазный силовой трансформатор (рисунок 17) состоит из двух стержней и двух ярм. Обмотки устанавливаются на стержнях, а ярма необходимы для создания замкнутого контура в магнитопроводе. Каждая обмотка состоит из пары частей, которые располагаются на двух стержнях, при этом данные части необходимо соединить или последовательно, или параллельно.

Однофазный броневой трансформатор в своей структуре (рисунок 18) обладает сплошным ярмом и стержнем, на который наматывается обмотка [8]. Следует также отметить, что сплошное ярмо практически закрывает обмотку словно «броня» [39].

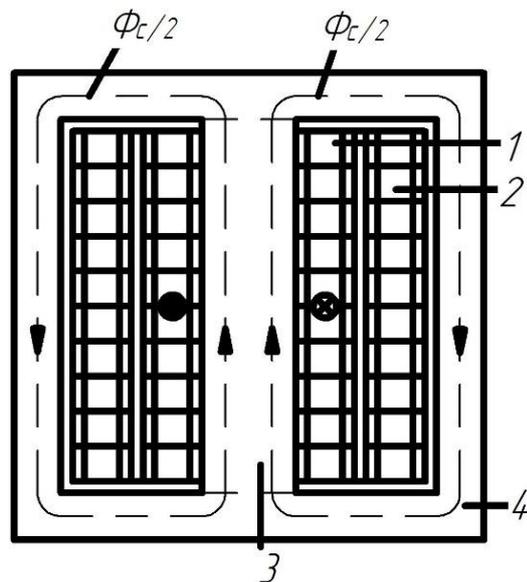


Рисунок 18 – Устройство однофазного броневое трансформатора:  
 1 – обмотки НН; 2 – обмотки ВН; 3 – стержень; 4 – ярмо;  $\Phi_c$  - магнитный поток магнитопровода

Выше мы рассмотрели способ преобразования переменного тока однофазной сети. Для преобразования трёхфазного тока используют или трёхфазный силовой трансформатор, или три однофазных силовых трансформаторов (рисунок 19). Соединяются однофазные силовые трансформатора довольно просто, определенный трансформатор подключается на определенную фазу [50].

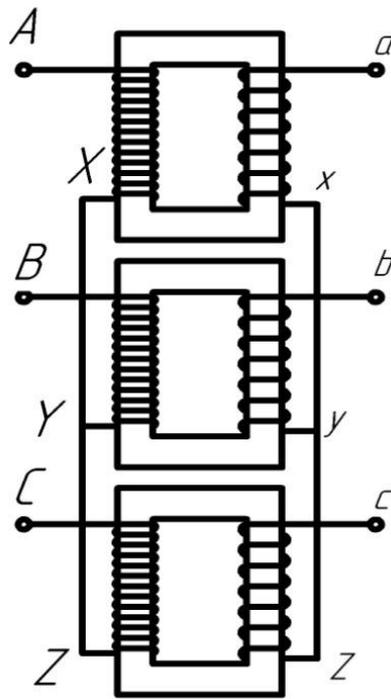


Рисунок 19 – Трёхфазный групповой трансформатор

Соединенные таким образом однофазные силовые трансформаторы называют трёхфазным групповым трансформатором. Тем не менее, ввиду дешевизны и компактности, всё-таки чаще используют трёхфазные трёхстержневые силовые трансформаторы. Конструкция трёхфазного трёхстержневого трансформатора показана на рисунке 20.

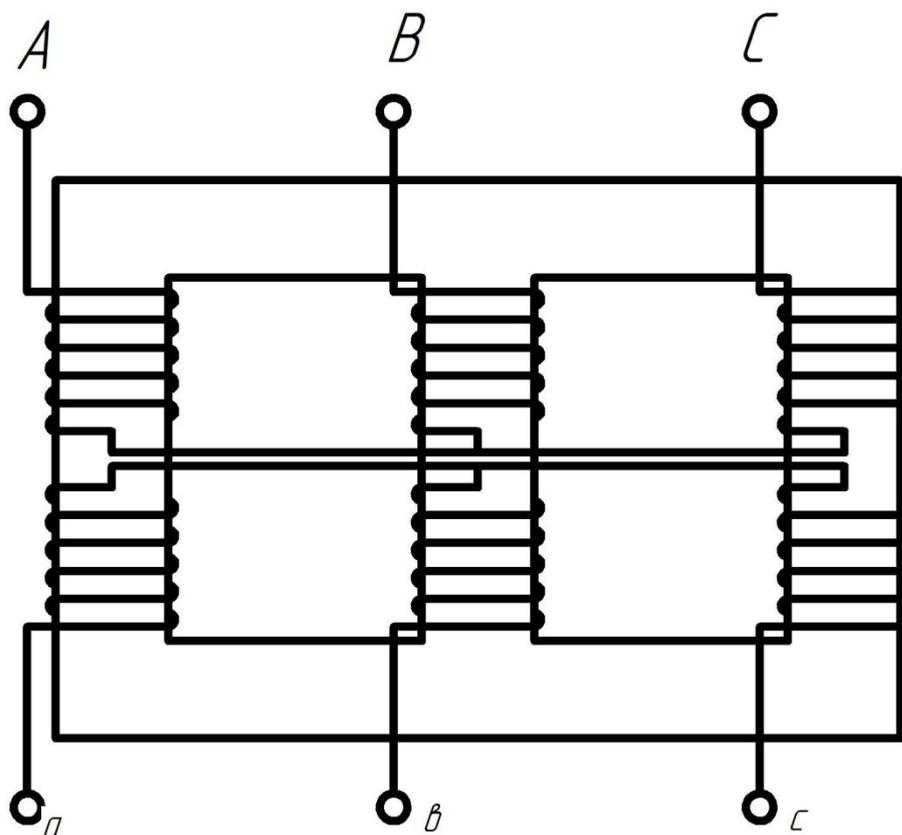


Рисунок 20 – Трёхфазный трехстержневой трансформатор

Конструкция трёхфазного трехстержневого трансформатора довольно таки примитивна, но при этом она является максимально эффективной. Разработал данную конструкцию русский учёный Михаил Осипович Доливо-Добровольский в 1889 г. Считается, что именно с разработки трёхфазного стержневого трансформатора началась эпоха электрификации.

Трёхфазный броневой трансформатор (рисунок 21) в отличие от трёхфазного стержневого обладает дополнительными боковыми стержнями, которые как бы защищают обмотки фаз А и С.

Также стоит упомянуть такой факт, что за границей распространены именно трёхфазные броневые трансформаторы. В нашей же стране – наоборот, используются, по большей части, трёхфазные трехстержневые трансформаторы.

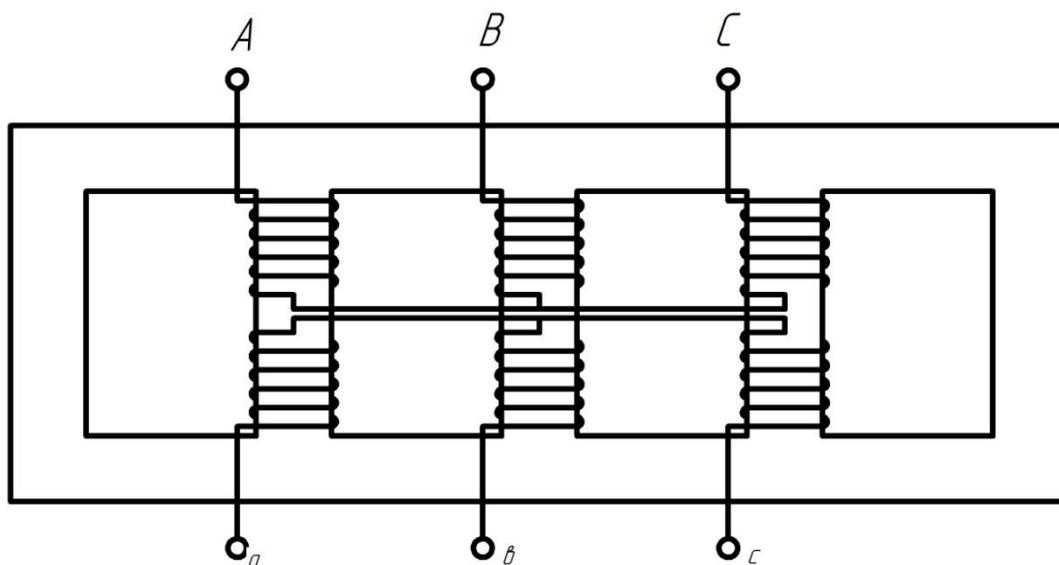


Рисунок 21 – Трёхфазный броневой трансформатор

#### 2.1.4 Конструкция сердечников

По методу соединения стержней с ярами силовые трансформаторы делят на сердечники со стыковыми соединениями (рисунок 22) и шихтованными соединениями (рисунок 23).

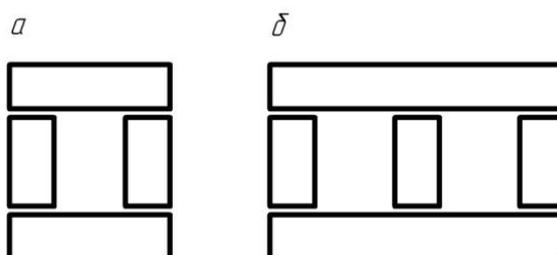


Рисунок 22 – Схемы стыковых сердечников

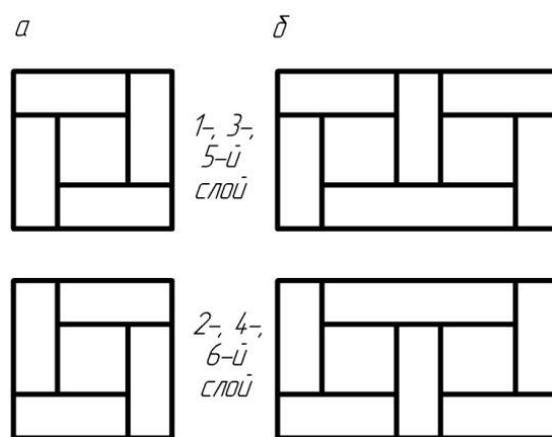


Рисунок 23 – Укладка листов стали в слоях шихтованных сердечников:

а – однофазных, б – трехфазных

Стержни и ярма стыковых сердечников собирают отдельно, затем, используя стяжные шпильки, соединяют друг с другом. Для ограничения вихревых токов, а также во избежание замыкания листов, в места стыков ставятся изоляционные прокладки [9].

Стержни и ярма шихтованных сердечников необходимо собирать вместе, словно цельную конструкцию, при этом листы стержней и ярм различных слоев собираются в переплет. При использовании стыковой конструкции сердечников присутствие немагнитных зазоров в местах стыков порождает значительное увеличение магнитного сопротивления этого сердечника, вследствие чего стыковые сердечники применяются очень редко.

Сечением стержней броневых сердечников является прямоугольник, в свою очередь, стержневые и бронестержневые сердечники в разрезе сечения имеют вид многоугольника, который вписали в окружность (рисунок 24 а). Чем больше мощность силового трансформатора, тем большее количество ступеней сердечника необходимо сделать. При работе трансформаторов сердечник имеет свойство нагреваться [28]. И если в трансформаторах с малой мощностью достаточно поверхностного охлаждения сердечника трансформаторным маслом, то в силовых трансформаторах с большой мощностью в сердечнике

предусматривают каналы для циркуляции охлажденного трансформаторного масла (рисунок 24 б).

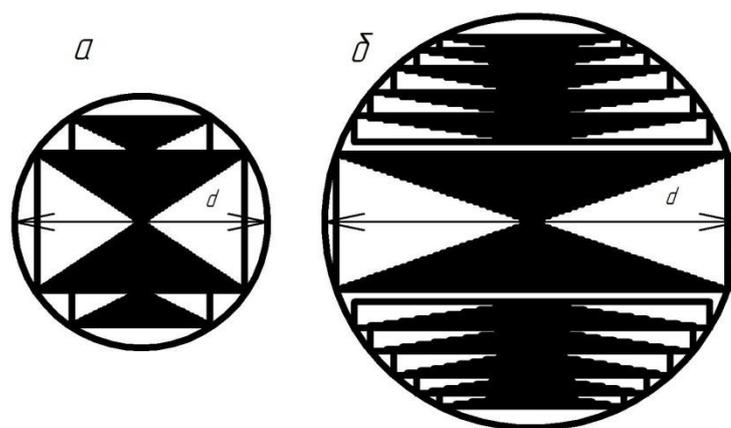


Рисунок 24 – Формы сечения стержней трансформаторов:  
а – малой мощности, б – большой мощности

Для того, чтобы собрать сердечники силовых трансформаторов используют листы электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм следующих марок: 3404, 3405, 3406, 3407, 3408. Чаще всего для сердечников используют холоднокатаную сталь [29].

Для ограничения вихревых токов и для высокой изоляции сердечника листы стали, из которых его собирают, либо с одной стороны покрывают специальной изоляционной бумагой толщиной 0,03 мм, либо с обеих сторон покрываются изоляционным масляным лаком.

### 2.1.5 Обмотки трансформаторов

Для предотвращения перегрева обмотки её конструкция должна удовлетворять условиям нагревостойкости. Также обмотки должны иметь высокую электрическую и механическую прочности, это необходимо для предотвращения их разрушения под действием ударных токов и внешних механических сил. Помимо этого, следует помнить, что в процессе работы

силового трансформатора необходимо, чтобы электрические потери в обмотке были минимальны. Опять же, изготовление обмоток должно быть просто по технологии и дешево по стоимости. Существует множество различных конструкций обмоток силовых трансформаторов, применение которых зависит от номинальных напряжения и тока [11].

Чаще всего обмотки силовых трансформаторов изготавливаются из медного провода, но в последнее время ввели практику изготовления обмоток из алюминиевого провода. В алюминиевых обмотках силовых масляных трансформаторах плотность тока составляет примерно  $0,72-1,8 \text{ А/мм}^2$ . В медных же обмотках плотность тока больше где-то на 40-45%.

По способу расположения на стержнях и по взаимному расположению обмоток высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН) обмотки делятся на концентрические (рисунок 25 а) и чередующиеся (рисунок 25 б).

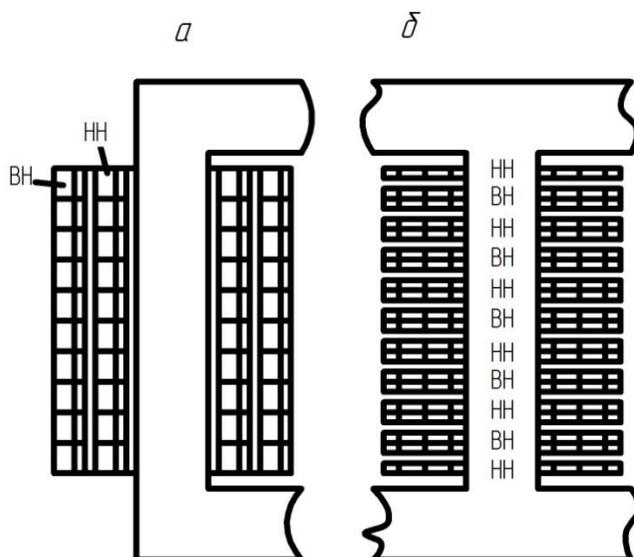


Рисунок 25 – Обмотки трансформаторов:

а – концентрические, б - чередующиеся

Концентрические обмотки ВН имеют больший радиус по сравнению с обмотками НН. Обе обмотки располагаются вокруг стержня магнитопровода, при этом обмотка НН размещена ближе, причем сделано это для того, чтобы

уменьшить массу изоляции обмотки. Чередующиеся обмотки ВН и НН расположены друг за другом вокруг стержня по высоте. К преимуществу чередующихся обмоток можно отнести тот факт, что они обладают более полной электромагнитной связью. К недостаткам же - сложность в изготовлении, так как при высоких напряжениях процесс усложняется. Вследствие чего, в силовых масляных трансформаторах используются концентрические обмотки. Существует множество различных вариаций конструктивной реализации концентрических обмоток. В частности, одной такой вариацией являются цилиндрические обмотки [60].

Цилиндрические обмотки выполняют из круглых или прямоугольных проводов с изоляцией из хлопчатобумажной пряжи и наматывают в один слой (однослойная), в два слоя (двухслойная) или несколько слоев (многослойная) одним или несколькими проводами по винтовой линии (рисунок 26).

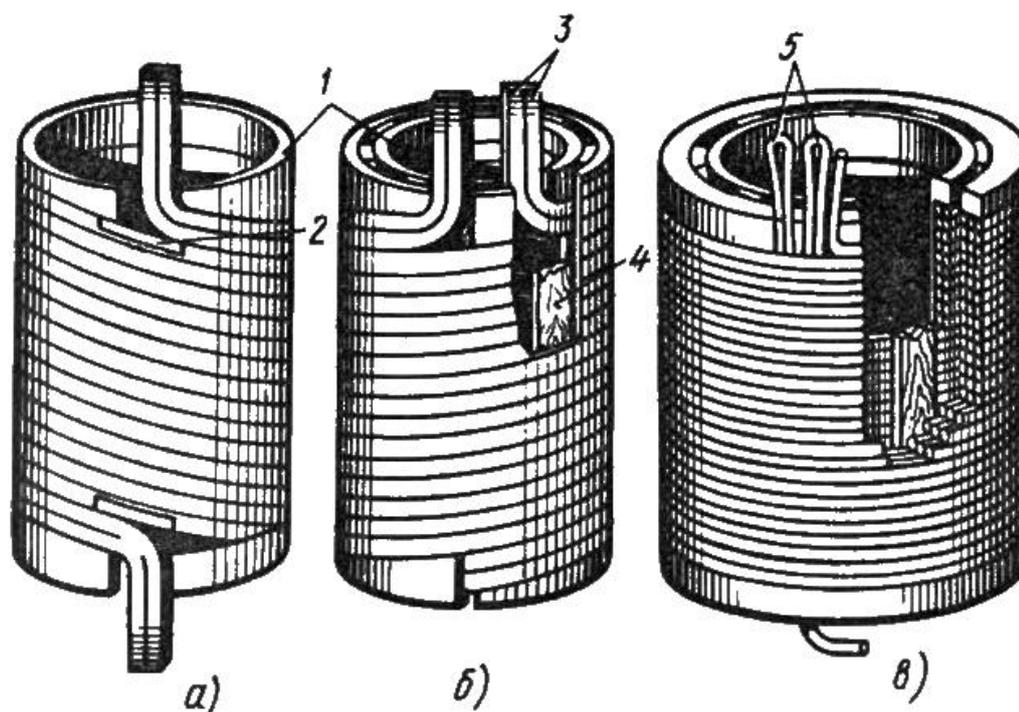


Рисунок 26 - Однослойная (а), двухслойная (б) и многослойная (в) конструкции цилиндрических обмоток силовых трансформаторов:

1 - выравнивающие кольца; 2 - коробочка из электрокартона; 3 - конец первого слоя обмотки; 4 - планка из бука; 5 - отводы для регулирования напряжения

Начала и концы обмоток располагают на их противоположных торцах. Однослойные и двухслойные обмотки применяются в качестве обмоток низкого напряжения, а многослойные - в качестве обмоток ВН в трансформаторах мощностью до 630 кВА.

Цилиндрические многослойные обмотки изготовляют из круглого провода, намотанного на бумажно-бакелитовый цилиндр, плотно укладывая витки слоями и прокладывая между ними листы кабельной бумаги. При большом числе слоев между ними укладывают планки из древесины твердых пород или из нескольких слоев полосок склеенного электрокартона, образуя вертикальные каналы. Такая конструкция обеспечивает хороший отвод теплоты для охлаждения обмотки. Для увеличения механической прочности обмотку обматывают хлопчатобумажной лентой, пропитывают глифталевым лаком и запекают при температуре около 100 °С.

В более мощных трансформаторах применяют непрерывные обмотки из плоских проводов без разрывов и паяк при переходе из одной катушки в другую. Эти обмотки наматываются на рейки, уложенные на бумажно-бакелитовом цилиндре и образующие в своих промежутках вертикальные каналы охлаждения, а горизонтальные каналы создаются с помощью пакетов из электротехнического картона, собранных на проваренных в масле деревянных планках. Они применяются в силовых трансформаторах в качестве обмоток низшего и высшего напряжения [12].

Промежуток между обмоткой и ярмом необходимо заполнять изоляцией для предупреждения пробоя обмотки. Эта изоляция производится из электротехнического картона, который выполняется в виде колец, шайб и прокладок. При высоких напряжениях может возникнуть ситуация, когда возникает надобность установить барьеры изоляции из электротехнического картона между баком трансформатора и обмотками.

## 2.1.6 Изоляция

Изоляция силовых трансформаторов представляет собой сложную систему, состоящую из различных как по значению, так и конструкции элементов и узлов.

Электрическая прочность изоляции – характеристика силового трансформатора, которая определяет его надежность в эксплуатации. На объем и массу силового трансформатора очень сильно воздействует размер изоляции. Следовательно, при проектировании изоляции силового трансформатора отдельное внимание уделяют оптимизации её конструкции.

Изоляция силового трансформатора встречается двух видов:

1. Внешняя;
2. Внутренняя.

К внешней изоляции силового трансформатора относятся:

1. Воздушные промежутки между вводами и заземлёнными частями трансформатора;
2. Воздушная изоляция между вводами разных обмоток;
3. Воздушные промежутки между вводами одной обмотки.

Таким образом, можно сделать вывод, что внешняя изоляция трансформатора состоит из окружающего его воздуха.

Изоляция частей, которые находятся в баке силового трансформатора, называется внутренней. Основным изолирующим веществом внутри бака является электротехническое масло. Внутренняя изоляция, помимо прочего, состоит из главной и продольной изоляций.

Главная изоляция - изоляция трансформатора, включающую в себя изоляцию обмотки, электрически соединенными с ней экранами, отводами и переключателями относительно заземленных частей магнитопровода и бака, а также изоляцию по отношению к соседним обмоткам, электрически не соединенным с нею.

Продольная изоляция - изоляция между электрически соединенными частями обмоток, отводов, экранов и переключателей, имеющих разные потенциалы [14].

На изоляцию трансформатора может повлиять множество явлений, иногда влияющих явлений может быть несколько. К данным явлениям относят:

1. Электрическое воздействие. Может быть спровоцировано не только номинальным и испытательным напряжениями, но и также атмосферными и коммутационными перенапряжениями;

2. Механические воздействия. Вызывается ударными токами, которые возникают при коротких замыканиях;

3. Тепловое воздействие. Данное воздействие приводит к старению витковой изоляции. Происходит это в следующих случаях:

а) В результате долгого контакта изоляции с нагретыми активными частями;

б) В результате влияния переменного электрического поля в изоляции трансформатора. В этом случае изоляция нагревается и выделяет тепло. У этого явления существует название – диэлектрические потери. При увеличении температуры изоляции в твёрдой части изоляции увеличиваются диэлектрические потери. При этом уменьшается электрическая прочность изоляции и её сопротивление

Для мониторинга состояния изоляции измеряют не потери, которые зависят как от силы электрического поля, так и от геометрических её размеров, а тангенс угла диэлектрических потерь, не зависящий от геометрических размеров изоляции;

4. Воздействие химических процессов. Данное воздействие случается в том случае, если в изоляции силового трансформатора присутствуют посторонние примеси, а также при влиянии высокой температуры. Примесями, которые негативнее всего влияют на изоляцию силового трансформатора, являются:

- а) влага, которая осталась в изоляции силового трансформатора при его сушке;
- б) остатки растворителя пропиточного лака, который не удалили при запекании пропитанных обмоток или при сушке трансформатора;
- в) воздушные или газовые включения в изоляции, которые остались при заполнении трансформаторным маслом;
- г) посторонние примеси (например, волокна) твердой и жидкой изоляции.

Увеличение диэлектрических потерь в изоляции силового трансформатора происходит при влиянии на неё электрического поля. А возрастание наличия влаги в твердой изоляции уменьшает её электрическую прочность. В процессе работы трансформатора со временем изоляционный лак стареет. Получается это по той причине, что после пропитки изоляции происходит неполная полимеризация лака или плохо прошло удаление растворителей.

Ещё одним вредным воздействием на бумажно-масляную изоляцию силового трансформатора являются газовые или воздушные промежутки. Они возникают в изоляции в процессе заливки бака трансформатора электротехническим маслом. Газовые и воздушные промежутки появляются между слоями бумажной изоляции. При влиянии электрического поля на места, в которых скапливается газ (воздух), там возникают корональные разряды. Они представляют собой слабые частичные разряды, повреждающие изоляцию. Помимо этого электрическая прочность изоляции силового трансформатора уменьшается, из-за газовых промежутков. Чтобы избежать возникновения данных промежутков баки силовых трансформаторов наполняют дегазированным маслом под вакуумом. А для избегания возникновения воздушных промежутков в изоляции применяют прогрев трансформатора [13].

Наличие механических примесей (волокон) в электротехническом масле благоприятствует переходу растворенной в этом масле воды в дисперсное состояние. Из-за этого происходит уменьшение пробивного напряжения масла.

Также, механические примеси, которые оседают на изоляции, способствуют созданию мостов, по которым возможен пробой.

В большом итоге можно сказать, что требования, которые предъявляют к изоляции силовых трансформаторов, сводятся к следующему выводу: изоляция должна выдерживать без повреждения все возможные в эксплуатации воздействия и удовлетворять нормам контрольных испытаний, позволяющих судить о прочности трансформатора в исходном его состоянии при выпуске с завода.

### **2.1.7 Способы охлаждения масляных трансформаторов**

В процессе работы силового трансформатора его магнитопровод и обмотки нагреваются, т.к. происходят потери электрической энергии в этих частях. На срок службы изоляции силового трансформатора, главным образом, влияет температура, на которую происходит нагрев его частей. Если у силового трансформатора высокая мощность, то для увеличения срока службы изоляции и уменьшения потерь, необходимо установить систему охлаждения с максимальной эффективностью.

Наиболее распространенные системы охлаждения силовых трансформаторов, которые используются в нашей стране:

а) Система охлаждения М (рисунок 27).

При этом виде охлаждения теплота, выделяющаяся в активной части и элементах металлоконструкции трансформатора, передается путем естественной конвекции маслу, которое, в свою очередь, отдает его в окружающий воздух также путем естественной конвекции и излучения. В трансформаторах небольшой мощности (до нескольких десятков кВА) теплоотдающей поверхности баков достаточно для отвода выделяющейся теплоты при нормированном превышении температуры масла. В трансформаторах большей мощности приходится ее искусственно увеличивать

путем применения ребристых и трубчатых баков или баков с навесными или выносными радиаторами.



Рисунок 27 – Трансформатор с системой охлаждения М

б) Система охлаждения Д (рисунок 28).

В трансформаторах мощностью более 6,3-10 МВ-А затруднительно развить теплоотдающую поверхность бака в такой мере, чтобы обеспечить заданный уровень нагрева [15]. Это становится понятным, если учесть, что согласно законам роста в серии подобных трансформаторов (т. е. в таких, в которых соответствующие линейные размеры пропорциональны), при постоянстве электромагнитных нагрузок (индукции в магнитопроводе и плотности тока в обмотках), потери растут пропорционально кубу линейных размеров, тогда как охлаждающие поверхности растут пропорционально квадрату этих размеров. Поэтому приходится принимать дополнительные меры для усиления охлаждения путем обдува радиаторов вентиляторами. Тем самым увеличивается в 1,5-2 раза коэффициент теплопередачи и соответственно теплосъем радиаторов. При снижении температуры верхних слоев масла до

50<sup>0</sup>С, если при этом ток нагрузки меньше номинального, вентиляторы отключаются.



Рисунок 28 – Трансформатор с системой охлаждения Д

в) Система охлаждения ДЦ (рисунок 29).

В трансформаторах мощностью около 100 МВА и более выделяющиеся потери очень велики. Поэтому для отведения тепла используют специальный масляно-воздушный охладитель. Также для уменьшения потерь в данной системе охлаждения применяют вентиляторы, которые обдувают охладители, а также насосы, используемые для принудительной циркуляции электротехнического. Чтобы процесс охлаждения трубы охладителя был максимально эффективен, поверхность её выполняют довольно таки ребристой. Вследствие принудительной циркуляции масла достигается более равномерное распределение температуры масла по высоте бака. Разница температуры масла вверху и внизу бака составляет в данном случае менее 10<sup>0</sup>С, в то время как при естественной циркуляции она достигает 20-30<sup>0</sup>С. Выпускаемые в настоящее время отечественной промышленностью охладители обладают характеристикой теплоотдачи примерно 160-180 кВт. Если возникает аварийная ситуация и у силовых трансформаторов происходит отключение системы охлаждения, то

необходимо срочно восстановить её работоспособность. Если произойдёт сбой в работе системы охлаждения силового трансформатора, то в этом случае период включения в сеть его должен быть небольшим, вследствие того, что отвести потери холостого хода теплоотдающая поверхность поверхности бака не в состоянии. К главному минусу относят тот факт, что у данной системы охлаждения передача тепла от обмоток маслу такая же, как у естественной конвекции [16]. Получается так потому, что принудительная циркуляция масла происходит только в зоне между наружной обмоткой и стенкой бака трансформатора.

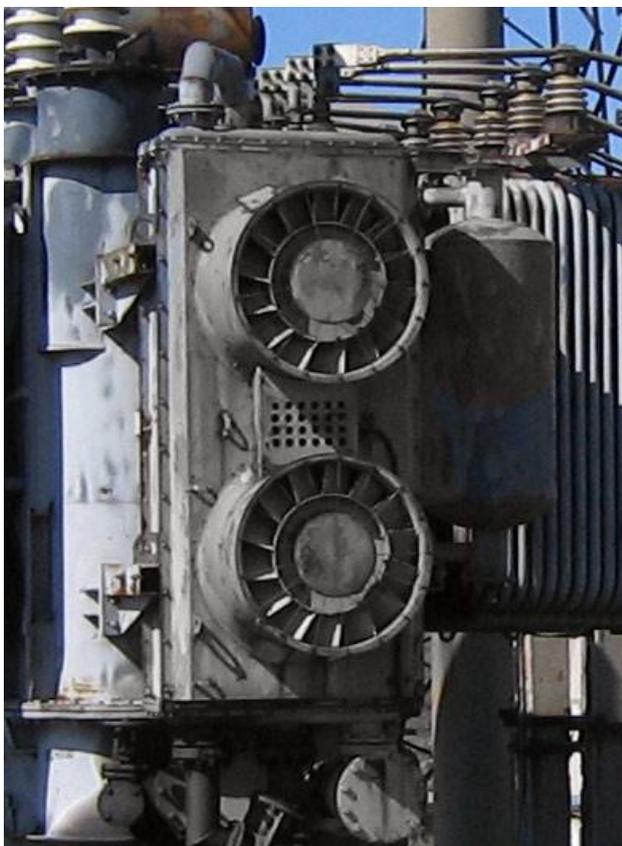


Рисунок 29 – Трансформатор с системой охлаждения ДЦ

г) Система охлаждения Ц (рисунок 30).

Эта очень эффективная и компактная система охлаждения применяется для мощных трансформаторов тогда, когда имеется достаточное количество

воды (гидростанции, очень мощные тепловые станции). Данная система охлаждения предоставляет возможность отказа от системы охлаждения ДЦ, являющейся слишком громоздкой, если силовой трансформатор имеет большую мощность. Эта система охлаждения основана на применении масляно-водяных охладителей с гладкими или оребренными трубами и движением воды по трубам, а масла - в межтрубном пространстве. Благодаря конструктивным мероприятиям обеспечивается зигзагообразное движение масла в охладителе с поперечным обтеканием трубок. Большой теплосъем (до 1000 кВт и более) и малые габаритные размеры масляно-водяных охладителей достигаются благодаря увеличению коэффициента теплоотдачи от стенки трубы при охлаждении ее водой. Если также произойдет какой-либо сбой в работе системы охлаждения Ц, то время включения силового трансформатора в сеть довольно таки ограничено. Основным минусом данной системы охлаждения также является слабая интенсивность охлаждения обмоток силового трансформатора [51].



Рисунок 30 – Трансформатор с системой охлаждения Ц

## 2.1.8 Ввода силового трансформатора

Ввода необходимы для силовых трансформаторов, чтобы изолировать присоединения обмоток друг от друга, от поверхности бака трансформатора, а также для соединения с другими электроустановками. Ввода силовых трансформаторов встречаются с различными формами и размерами (рисунок 31), которые зависят от напряжения, применяемых на данном трансформаторе, и других различных требованиях.

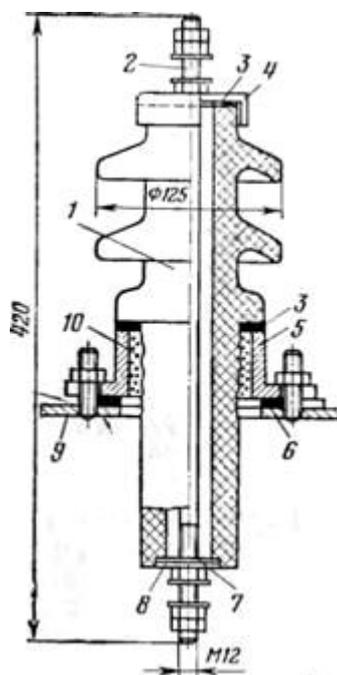


Рисунок 31 – Ввод силового трансформатора: 1 - фарфоровый изолятор; 2 - токоведущая шпилька; 3 - резиновая шайба; 4 - колпак; 5 - фланец; 6 - прокладка; 7 - электрокартонная шайба; 8 - стальная шайба; 9 - крышка трансформатора; 10 - армировочная замазка

Ввод обладает изолятором из фарфора 5, чугунным фланцем 8, служащем для закрепления ввода на стенке или крышке бака, и токоведущим медным стержнем 1, электрически связывающий обмотку силового трансформатора с

отдельными элементами электроустановки. Изолятор ввода силового трансформатора внутренней установки обладает гладкой или мелкорребристой поверхностью.

Изолятор ввода трансформатора наружной установки имеет большие ребра зонтообразной формы, что намного увеличивает разрядные расстояния и даже при сильном дожде и большом загрязнении изолятора позволяет избежать разрядов по его поверхности [52].

В старых силовых трансформаторах применялись вводы, для замены которых, в случае их повреждения, приходилось вынимать активную часть из бака или снимать крышку. В настоящее время чтобы упростить операции замены ввода в силовых трансформаторах применяют съемные вводы, которые не обладают фланцами и обоймами.

Если изолятор этого ввода повредился, то этот изолятор можно заменить, не затрагивая сердечник. Для этого необходимо отвернуть с токоведущего стержня наружные гайки, раскрепить устройство, прижимающее ввод к крышке, снять с ввода колпак и находящееся под ним уплотняющее резиновое кольцо. Потом снять изолятор, заменить его новым и собрать вновь ввод.

Прохождение по токоведущему стержню ввода больших токов сопровождается созданием сильного магнитного поля, вызывающего недопустимый нагрев фланцев и крышки. Чтобы уменьшить нагрев чугунных и стальных фланцев вводов, на токи выше 400 А устанавливают латунные фланцы.

Чтобы ограничить нагрев крышки, используют следующий из способов:

1) Необходимо увеличить диаметр отверстия в крышке для ввода, что увеличит расстояние до токоведущего стержня и тем самым ослабит магнитное поле в крышке, а следовательно, уменьшится ее нагрев;

2) Размещают ввода одного напряжения рядом, а в крышке для них вырезают общее отверстие. В этом случае суммарный магнитный поток получается нулевой и крышка не нагревается. Для установки вводов в общем вырезе крышки применяют чугунные или латунные обоймы [53].

## 2.1.9 Бак силового трансформатора с арматурой

Бак силового трансформатора выполняет довольно таки много различных функций:

1) Является механической основой. Именно на бак крепятся все составляющие элементы силового трансформатора. Также на баке крепится очень важная информационная табличка, на которой указаны паспортные данные этого трансформатора. На ней обозначены все данные, чтобы подключить этот трансформатора в сеть, а также основные массы.

2) Является одной из составляющей системы охлаждения силового трансформатора. Как минимум, бак является хранилищем электротехнического масла, которое кроме функции изоляции, также имеет функцию охлаждения силового трансформатора.

Раньше баки изготавливали в форме волн или трубок. Сейчас же все баки обладают гладкой поверхностью, и имеют либо овальную, либо прямоугольную форму.

К трансформаторной арматуре относят приборы, которые необходимы для нормальной длительной работы в различных условиях. Приборы относящиеся к трансформаторной арматуре:

1) Термосифонный фильтр. Необходим чтобы очищать трансформаторное масло от различных продуктов старения и влаги, которая в него попадает.

2) Расширитель. Необходим для того, чтобы при колебаниях температуры от +40 до – 45 °С по Цельсию, трансформаторное масло при расширении не разорвало бак.

3) Воздухоосушитель. Необходим для того, чтобы воздушная полость расширителя сообщалась с внешним воздухом.

4) Сорбент, засыпанный в воздухоосушитель. Необходим для того, чтобы извлекать влагу из воздуха, который поступает в расширитель силового

трансформатора при понижении и повышении уровня электротехнического масла в нём.

Время от времени необходимо менять сорбент, находящийся в колпаке воздухоосушителя, так как он полностью израсходовал свой ресурс. Определяется срок замены сорбента очень легко, в рабочем состоянии индикаторный имеет голубой цвет, а когда цвет становится розовым, это говорит нам, что пора менять сорбент.

В современных силовых трансформаторах воздухоосушитель устанавливается не отдельно на поверхности, а встраивается в расширитель. Арматурой силового трансформатора также являются:

- 1) Сливные пробки.
- 2) Заливные пробки.
- 3) Пробка для отбора пробы масла.

Стоит отметить, что у силового трансформатора также присутствуют контрольно-измерительные устройства, защитные устройства. Их устройство и принцип действия на самом деле, довольно таки прост, но уровень ответственности, которые они несут, очень высок. От работы этих устройств зависит надежность работы силового трансформатора, а также безопасность обслуживающего персонала электростанции, подстанции и промышленных предприятий [54].

### **2.1.10 Регулирование напряжения силового трансформатора**

Регулирование напряжения трансформатора - процесс изменения числа витков обмотки силового трансформатора. Регулирование применяется для того, чтобы поддерживать необходимый уровень напряжения во время различных его проседаний.

Большая часть силовых трансформаторов обладает специальными приспособлениями, которые необходимы для изменения напряжения на

определенной обмотке добавлением или отключением определенного числа витков.

Регулирование напряжения силового трансформатора можно производить двумя способами:

1) Применяя специальный переключатель количества витков трансформатора под нагрузкой.

2) Установкой в определенное положение болтового соединения при обесточенном и заземлённом трансформаторе.

Сложность второго способа зависит от геометрических размеров силового трансформатора, категории потребителей, которых он обслуживает, а также количеством переключений какое необходимо совершить.

а) Переключение без возбуждения.

При переключении без возбуждения необходимо отключать силовой трансформатор от питающей сети, делать это часто затруднительно, так как придётся прерывать электроснабжение потребителей электрической энергии. Поэтому переключение без возбуждения чаще всего используют во время сезонных переключений.

Переключение без возбуждения предоставляет возможность регулировать выходящее напряжение силового трансформатора в диапазоне  $\pm 5\%$ . На силовых трансформаторах с малой мощностью данный способ выполняется с помощью двух ответвлений. У силовых трансформаторах средней и большой мощности переключение без возбуждения выполняется с использованием четырёх ответвлений по 2,5% на каждое.

Установка переключателя без возбуждения чаще всего происходит на той стороне силового трансформатора, на которой необходимо изменять напряжение в процессе эксплуатации. Также установка переключателя на высокой стороне напряжения выгодно наличием большого количества витков на этой стороне, можно с высокой точностью установить необходимое напряжение. Не стоит также забывать, что чем выше напряжение, тем ниже

сила тока, следовательно, при установке на высоком напряжении переключатель можно сделать довольно таки компактным. Однако, у понижающих силовых трансформаторов при регулировке напряжения в магнитопроводе будет изменяться величина магнитного потока. При номинальных условиях изменение этой величины не принимается в расчёт.

Стоит отметить также, что при регулировке напряжения переключателем без напряжения со стороны питания будет отличаться от регулировке напряжения переключателем со стороны нагрузки. Если при регулировании напряжения переключателем на низкой стороне силового трансформатора повышать напряжение, то для этого число витков необходимо увеличить. Однако, если регулирование проходит по высокой стороне силового трансформатора, то для повышения напряжения на потребителе необходимо уменьшать число витков.

Переключение без возбуждения очень просто изготавливается, а также имеет очень низкую цену. Однако все эти плюсы меркнут на фоне постоянных необходимых отключений потребителей электрической энергии, для изменения напряжения.

Поэтому этот способ применяется главным образом для коррекции вторичного напряжения сетевых понижающих трансформаторов в зависимости от уровня первичного напряжения на данном участке сети в связи с сезонным изменением нагрузки.

#### б) Переключение числа витков без возбуждения.

Переключатель числа витков без возбуждения обладает довольно таки простым устройством, которое предоставляет соединение с выбранным переключателем числа витков в обмотке. Данный переключатель также можно использовать только при отключенном питании на силовом трансформаторе. У этого переключателя есть второе название, «анцапфа». Хотя оно является более жаргонным, конечно.

Чтобы уменьшить сопротивление соединения контактов переходного сопротивления и для поддержания стабильности этого соединения используется специальная пружина, иногда вызывающая вибрацию. При долгом нахождении переключателя без движения в течении очень долгого времени, сопротивление контакта будет увеличиваться из-за окисления материала в точке контакта. Затем контакт нагревается, приводя масло к разложению, и на контактах остаётся осадок пиролитического углерода, данное обстоятельство тоже увеличивает сопротивление и снижает степень охлаждения. Происходит это по той причине, что контакт чаще всего изготавливают из меди или латуни, которые обладают довольно таки большим электрическим сопротивлением.

В результате вышесказанных происшествий наступает момент, когда либо происходит срабатывание газовой защиты силового трансформатора, либо происходит поверхностный пробой на изоляции, на которой осели продукты разложения масла.

Один раз в сезон, перед наступлением зимнего максимума и летнего минимума нагрузки, необходимо проводить проверку правильности установки переключателя на силовом трансформаторе. Чтобы уровень установленного напряжения приблизительно был равен сезонному значению. Проверки проводятся силами работающего персонала на электростанции, подстанции или предприятия. И не стоит забывать, что регулировку напряжения необходимо проводить при отключенном силовом трансформаторе. При этом необходимо провернуть переключатель во все положения и желательно несколько раз, таким образом, будут удалены химические осадки и различные плёнки окиси со всех положений.

Чтобы определить качество контактов, через определенное время необходимо проводить измерение сопротивления обмоток постоянным током. Также этот процесс необходимо проводить, в том случае, когда силовым трансформатором долгое время был отключен, но его опять подключают в сеть.

#### в) Регулирование под нагрузкой.

Регулирование под нагрузкой как понятно из названия, способно регулировать напряжение на обмотках силовых трансформаторов, при этом отключать его не нужно. Регулировка под нагрузкой используется для оперативных переключений, которые связаны с частым изменением нагрузки. Регулировка под нагрузкой имеет диапазон изменения напряжения, который может изменяться от  $\pm 10\%$  до  $\pm 16\%$ . Данный диапазон зависит от того, какой мощностью обладает силовой трансформатор, а также на каком напряжении происходит изменение напряжения. Однако стабильно регулировку под нагрузкой устанавливают на высокой стороне, потому что, как уже было сказано, при большем напряжении – меньший ток, следовательно, устройство регулировки будет проще в изготовлении и гораздо дешевле. Проводить регулировку под нагрузкой можно и автоматически, и вручную из оперативного пункта управления или диспетчерского пульта управления

Принцип работы регулировки под нагрузкой основан на изменении числа витков. Существуют и минусы изготовления устройств регулирования под нагрузкой:

- 1) При изменении числа витков происходит возникновение электрической дуги крупной мощности, что может привести к поломке силового трансформатора и отключению большого количества потребителей.

- 2) Использование кратковременных замыканий части витков обмоток.

Чтобы в короткозамкнутых обмотках ограничить ток используют токоограничивающие сопротивления. В качестве токоограничивающего сопротивления используются индуктивности (реакторы) и резисторы.

## 2.2 Намагничивание сердечников трансформаторов

### 2.2.1 Процесс намагничивания

Рассмотрим особенности намагничивания сердечников трансформаторов, первичные обмотки которых подключаются к источнику с синусоидальным напряжением. Анализ процесса намагничивания выполним для режима холостого хода однофазного трансформатора.

Намагничивающим током в этом режиме оказывается ток первичной обмотки, величина которого в силу высокой проводимости сердечника незначительна. В таких условиях величины ЭДС рассеяния и падение напряжения в первичной обмотке будут столь малы, что ими пренебрегаем [19]. Тогда приложенное напряжение  $u_1$  будет в основном уравновешиваться ЭДС первичной обмотки  $e_1$ . Если  $u_1 = -e_1 = U_{1m} \cdot \sin \omega t$ , тогда

$$\Phi_c = \Phi_{cm} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

то есть поток в сердечнике будет изменяться по гармоническому закону.

Магнитными потерями в стали пренебрегаем. Тогда потребляемый из сети ток холостого хода  $i_1 = i_{10}$  считаем чисто реактивным, намагничивающим током  $i_{10} = i_{0r}$ . Закономерность изменения этого тока, возбуждающего гармонически изменяющийся во времени магнитный поток  $\Phi_c$ , представлена построениями на рисунке 30.

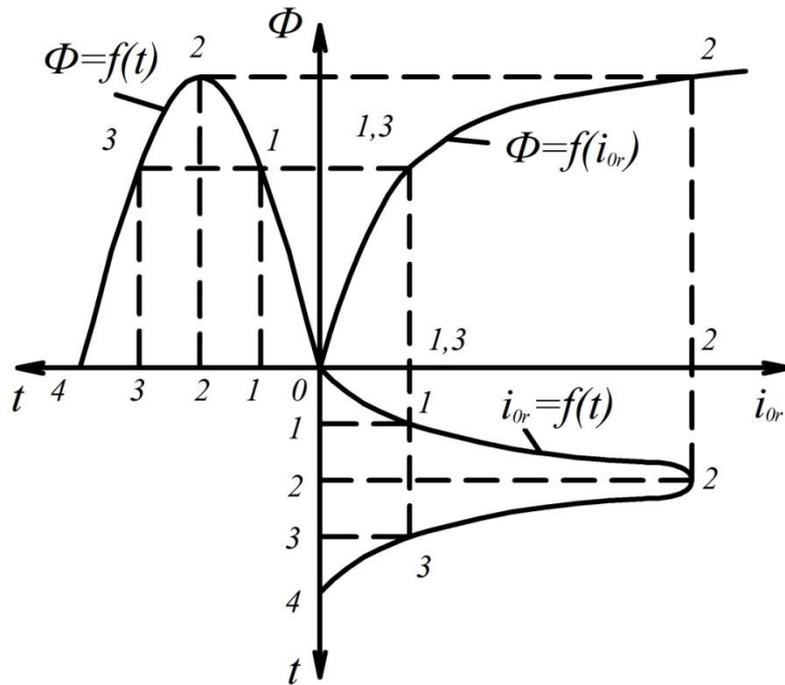


Рисунок 32 – Определение реактивной составляющей намагничивающего тока однофазного трансформатора

На рисунке 32 в правом верхнем квадрате нарисована кривая  $\Phi_c = f(i_{0r})$  при наличии насыщения, а в левом верхнем квадрате – синусоидальная кривая  $\Phi_c = f(t)$ , где  $t$  - время. В нижнем правом квадрате изображена кривая  $i_{0r} = f(t)$ , которую можно получить, если значения  $\Phi_c$  на кривой  $\Phi_c = f(t)$  для отдельных моментов времени 1,2,3 и т.д. перенести на кривую  $\Phi_c = f(i_{0r})$ , а получаемые при этом значения  $i_{0r}$  перенести вниз и отложить для этих же моментов времени. Отрицательная полуволна кривой  $i_{0r} = f(t)$  будет иметь такую же форму, как и положительная [18]. Видно, что из-за насыщения магнитопровода синусоидальный поток  $\Phi_c$  возбуждается несинусоидальным током  $i_{0r}$ . Такая несинусоидальная кривая  $i_{0r} = f(t)$  (рисунок 33) содержит все нечетные гармоники ( $n=1,3,5\dots$ ), из которых наряду с первой, или основной, наиболее сильной будет третья

гармоника. В случае использования для построения сердечника горячекатаной стали и максимальной индукции 1,4 Тл третья гармоника составляет около 30%, а пятая – около 15% от основной [59].

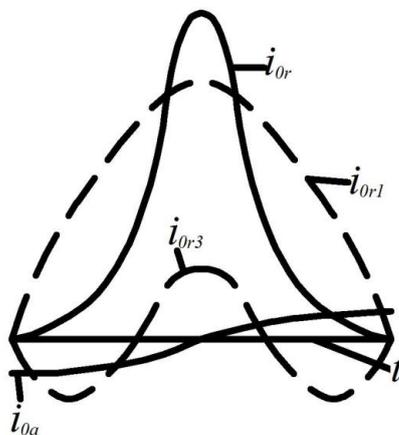


Рисунок 33 – Гармоники намагничивающего тока однофазного трансформатора

Кроме реактивной составляющей  $i_{0r}$  ток холостого хода  $i_0$  содержит также относительно малую активную составляющую  $i_{0a}$ , которая синусоидальна и вызвана магнитными потерями в сердечнике. Полный намагничивающий ток  $i_0 = i_{0r} + i_{0a}$  имеет несимметричную форму.

### 2.2.2 Трёхфазный трансформатор с соединением обмоток звезда/треугольник

Пусть на холостом ходу к трёхфазной сети с симметричным синусоидальным напряжением подключена обмотка, соединенная «треугольником» (рисунок 34 а).

Так как каждая фаза этой обмотки подключена к синусоидальному напряжению сети, следовательно, потоки каждой фазы также будут синусоидальными а намагничивающие токи фаз  $i_{0ra}, i_{0rb}, i_{0rc}$ , как и в случае однофазного трансформатора, будут содержать нечетные высшие гармоники.

Основные гармоники намагничивающих токов отдельных фаз обмотки будут сдвинуты относительно друг друга на  $120^{\circ}$ , третьи гармоники будут сдвинуты на  $3 \cdot 120^{\circ} = 360^{\circ}$ , или  $0^{\circ}$ , пятые – на  $5 \cdot 120^{\circ} = 600^{\circ}$ , или  $240^{\circ}$ , седьмые – на  $7 \cdot 120^{\circ} = 840^{\circ}$ , или  $120^{\circ}$ , девятые – на  $9 \cdot 120^{\circ} = 3 \cdot 360^{\circ}$ , или  $0^{\circ}$ , и т.д.

Таким образом, гармоники кратные трём ( $n=3,9,15\dots$ ), в отдельных фазах обмотки будут совпадать по фазе. По этой причине в линейных токах, которые представляют собой разность токов соответствующих фаз, гармоники, кратные трем, будут отсутствовать [17]. Токи этих гармоник будут циркулировать внутри замкнутого треугольника (рисунок 33 а), причём, будучи равными по значению и совпадая по фазе, они образуют общий замкнутый циркуляционный ток.

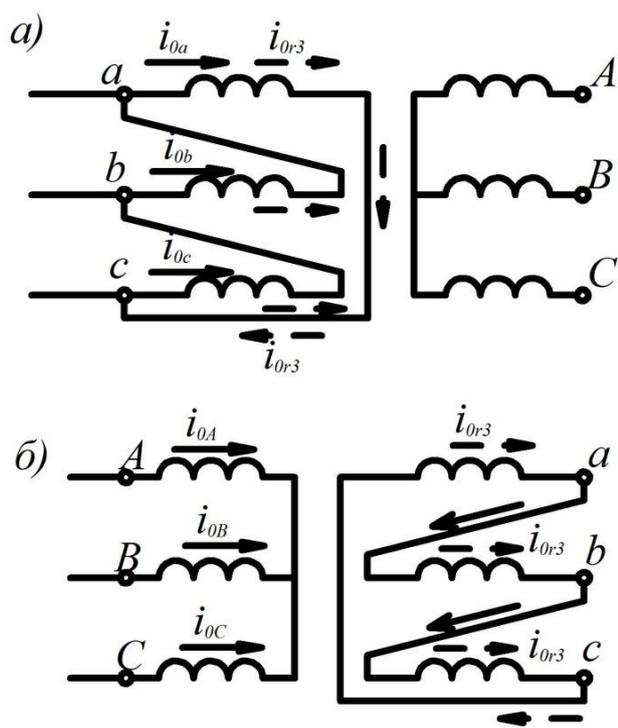


Рисунок 34 – Питание трансформатора с соединением обмоток треугольник/звезда на холостом ходу: а – со стороны обмотки, соединенной в «треугольник», б – со стороны обмотки, соединенной в «звезду»

Если трансформатор с соединением обмоток треугольник/звезда питать на холостом ходу со стороны обмотки, соединенной в «звезду» (рисунок 34 б), то гармоники, кратные трём, в фазных токах существовать физически не смогут. Поскольку в рассматриваемом случае наличие гармоник тока, кратных трем, невозможно, то поток будет несинусоидальным. При отсутствии гармоник, кратных трём, ток  $i_{0r}$  будет близок к синусоидальному (рисунок 32), так как гармоники  $n=5,7$  относительно малы. При такой форме тока  $i_{0r}$  кривая потока  $\Phi_y$  вследствие насыщения будет иметь уплощенную сверху форму (рисунок 18 а) и наряду с основной гармоникой  $\Phi_{1y}$  будет содержать относительно сильную третью гармонику  $\Phi_{3y}$ . Третьи гармоники потока  $\Phi_{3y}$  всех трех фаз совпадают по фазе и будут индуцировать во вторичной обмотке, соединенной «треугольником», три равные по значению и совпадающие по фазе ЭДС  $E_{3\delta}$  (рисунок 35 б).

Складываясь в контуре «треугольника», эти ЭДС создают в нем ток  $I_{3\delta}$ , который вследствие преобладания индуктивного сопротивления будет почти чисто индуктивным [2]. Создаваемые этими токами потоки  $\Phi_{3\delta}$  будут почти полностью компенсировать потоки  $\Phi_{3y}$ . Поэтому результирующие потоки фаз будут практически синусоидальными [21]. Таким образом, по сравнению с питанием со стороны обмотки, соединенной «треугольником», в этом случае третья и кратные ей гармоники намагничивающего тока возникают на вторичной стороне (рисунок 35 б).

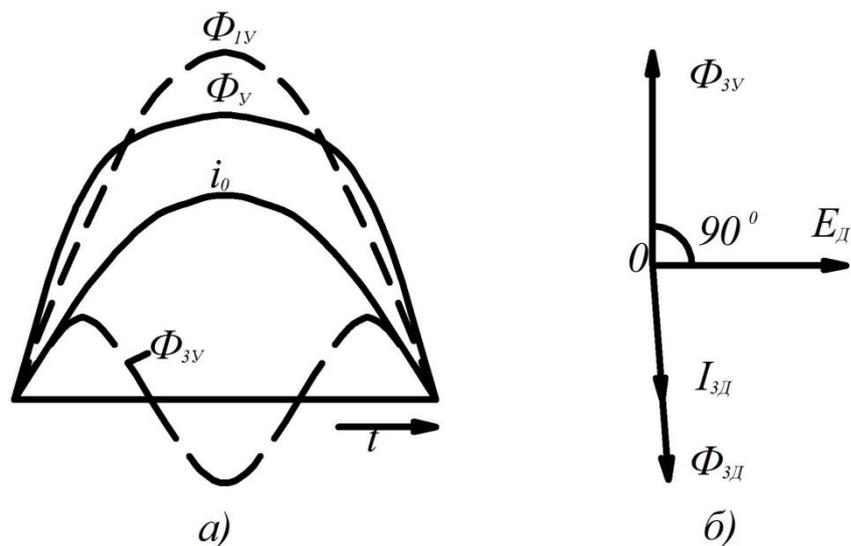


Рисунок 35 – Форма кривой потока при синусоидальном намагничивающем токе (а) и векторная диаграмма потоков и токов третьей гармоники (б)

Из изложенного следует, что в случае соединения одной из обмоток трансформатора в «треугольник» магнитные потоки, ЭДС и напряжения фаз остаются синусоидальными. Это обстоятельство является существенным преимуществом трехфазных трансформаторов, у которых одна из обмоток соединена в «треугольник». Сказанное в равной степени относится к групповым трехфазным трансформаторам, а также к трёхфазным трансформаторам с общим сердечником.

### 2.2.3 Трёхфазный трансформатор с соединением обмоток звезда/звезда

В трансформаторе с таким соединением обмоток кратные трем гармоники ( $n=3,9,15$ ) в намагничивающих токах первичной и вторичной обмоток, как выяснилось ранее, существовать не могут [20]. Потому магнитные потоки фаз наряду с основной гармоникой  $\Phi_1$  содержат ещё трети гармоники потока  $\Phi_3$ .

Следовательно, характерной особенностью намагничивания сердечников трехфазных трансформаторов с соединением обмоток звезда/звезда является

наличие третьих гармоник потока  $\Phi_3$ , которые во всех трёх фазах магнитопровода совпадают по фазе. Эти потоки индуцируют в фазных обмотках третьи гармоники ЭДС. В результате фазные ЭДС и напряжения оказываются несинусоидальными и содержат третьи гармоники ЭДС  $E_3$ . Величина этих гармоник может быть значительной. Так, например, если  $\Phi_3$  составляет 10% от  $\Phi_1$ , то ЭДС  $E_3$  составляет уже 30% от  $E_1$ , поскольку поток  $\Phi_3$  изменяется с трёхкратной частотой. Однако линейные ЭДС и напряжения синусоидальны, так как в разности ЭДС двух фаз ЭДС  $E_3$  исчезает [38].

В трёхфазной группе однофазных (рисунок 33 а) и бронестержневых (рисунок 33 б) трансформаторов потоки  $\Phi_3$  в каждой фазе замыкаются по замкнутому сердечнику, как и поток  $\Phi_1$ . Однако в трёхстержневом трансформаторе потоки  $\Phi_3$  по замкнутому пути в сердечнике замыкаться не могут, так как в каждый момент времени во всех стержнях они имеют одинаковое направление (рисунок 36 в). Поэтому потоки  $\Phi_3$  замыкаются от одного ярма к другому через трансформаторное масло или воздух, а также через крепежные детали и стенки бака трансформатора, что приводит к уменьшению потоков  $\Phi_3$  по сравнению с такими потоками в трансформаторах других типов [22]. Замыкание потока через крепежные детали и стенки бака трехстержневого трансформатора вызывает потери на вихревые токи.

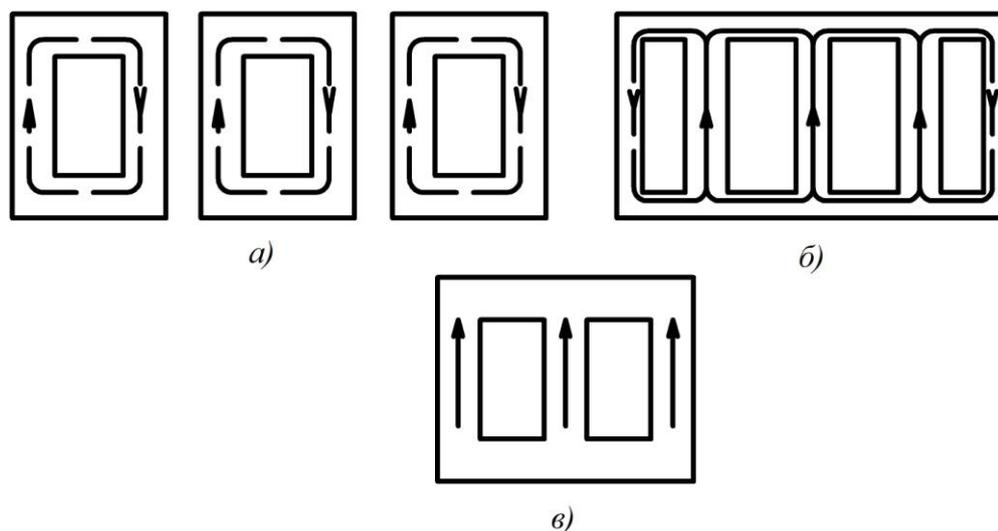


Рисунок 36 – Третьи гармоники потока в трехфазных трансформаторах

В итоге, в трехфазных силовых трансформаторах, имеющих соединение обмоток звезда/звезда, могут возникать неблагоприятные явления, такие как искажение кривых фазных напряжений. В трехстержневых силовых трансформаторах возникают также добавочные потери от вихревых токов. Наличие нулевого провода, в принципе, могло бы улучшить положение, так как при этом образуется замкнутый контур для третьих гармоник тока  $I_3$ , причём в нулевом проводе возникает ток  $3I_3$ . Однако если этот контур создается через сопротивление нагрузки или другие сопротивления, то величина токов  $I_3$  и их влияние будут малы.

Принимая во внимание изложенное, мощные высоковольтные трансформаторы с соединением обмоток по схеме звезда/звезда, как правило, не строят [23]. Если же в отдельных случаях возникает потребность в таких трансформаторах (например, при необходимости заземления нулевых точек с обеих сторон), то в трансформаторе можно намотать дополнительную, третичную обмотку с соединением в «треугольник», сечение которой рассчитано только на токи  $I_3$ .

### **3 Компьютерное моделирование токов намагничивания в силовых трансформаторах при протекании постоянных токов в системе электроснабжения**

#### **3.1 Выбор типа моделей силовых трансформаторов**

Современная система электроснабжения представляет собой сложную систему с большим количеством элементов работающих одновременно. Из-за сложности протекающих физических процессов в ЭЭС невозможно производить эксперименты в реальном времени, поэтому все большее значение в современном мире приобретает смысл создания моделей ЭЭС на персональных компьютерах. Это позволяет проводить и исследовать различные эксперименты ЭЭС в тех или иных ситуациях. Тем более в современных условиях развития средств моделирования, появляется возможность создавать вполне детализированные модели.

Современные технические и программные средства позволяют создавать сложные и детальные математические модели «реальных» ЭЭС. Одной из передовых систем компьютерного моделирования является среда Matlab, с программным пакетом SimPowerSystems. Данный программный пакет предназначен для создания электротехнических систем.

Именно в программе Matlab мы соберём математическую модель силовых стержневого и бронестержневого трансформаторов. Моделирование в Matlab предоставляет возможности для того, чтобы максимально точно смоделировать необходимые нам модели. Для достижения данных целей программе необходимо принимать во внимание огромное число важнейших факторов. В Matlab происходит одновременное вычисления параметров, при этом учитываются всевозможные воздействия и влияния их друг на друга. В конечном итоге мы получаем картину максимально приближенную к реальному процессу. Использование математической модели в программе Matlab позволяет с помощью блоков моделирования и вычисления

воспроизводить такие эксперименты, в реальной жизни которые произвести невозможно. Ведь большинство проводимых натуральных экспериментов требуют значительного количества финансирования, которое не все могут позволить себе[10].

В программе Matlab в библиотеке Simulink-SimPowerSystems параметры блоков моделирования задаются в относительных единицах (о.е., на английском р.и.). В более новых версиях Matlaba можно задавать параметры блоков моделирования и в именованных единицах, и в относительных единицах. При этом рассчитать и занести значения можно в именованных единицах, а сама программа уже перенесёт значения в относительные единицы. также можно и наоборот. К достоинствам относительных единиц относят следующий факт: у силовых трансформаторов с мощностью  $300 \div 300000$  кВА активное сопротивление имеет значение  $0,002 \div 0,005$  о.е., а индуктивное сопротивление имеет значение  $0,03 \div 0,12$  о.е. Следовательно, если возникает ситуация, при которой параметры силового трансформатора неизвестны при известной мощности, то можно будет использовать приблизительные значения из вышесказанного диапазона [24].

Модель силового трехфазного двухобмоточного трансформатора базируется на основе трех однофазных трансформаторов. В данной модели учитываются нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника и гистерезис (рисунок 36). Единственная проблема, которая возникает при моделировании трёхфазного силового трансформатора в программе Matlab, связано с отсутствием большого количества источников информации и методических указаний в русских и иностранных источниках [3].

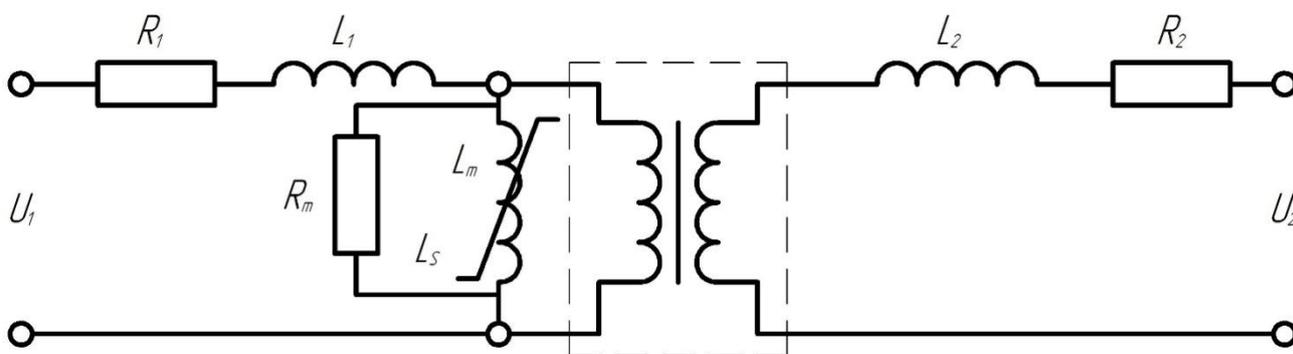


Рисунок 37 – Т-образная схема силового двухобмоточного трансформатора

Для создания в программе Matlab Т-образной схемы силового трансформатора необходимо определить следующие параметры:

1.  $R_1$ ,  $L_1$  - соответственно активное сопротивление первичной обмотки, индуктивность первичной обмотки;
2.  $R_2$ ,  $L_2$  - соответственно активное сопротивление вторичной обмотки, индуктивность вторичной обмотки;
3.  $R_m$  - активное сопротивление ветви намагничивания;
4.  $L_m$  - индуктивность ветви намагничивания;
5.  $L_s$  - характеристика намагничивания в области насыщения.

Необходимо подчеркнуть, что при моделировании силовых трансформаторов в программе Matlab обычно, ветвь намагничивания отображается последовательным соединением активного и индуктивного сопротивлений, но в данной работе решено элементы ветви соединить параллельно. В модели силового двухобмоточного трансформатора из библиотеки Matlab (рисунок 37) индуктивность  $L_m$  учитывает действие основного магнитного потока, а активное сопротивление  $R_m$  эквивалентно потерям в стали магнитопровода [7].

### 3.2 Компьютерное моделирование токов намагничивания в бронестержневых трансформаторах при протекании постоянных токов в системе электроснабжения

Для задания параметров трансформатора в схеме Matlab необходимо рассчитать их, основываясь на исходных данных этого трансформатора. В данной работе провожу моделирование силового трансформатора ТДЦ-400000/242/15,75, паспортные данные которого указаны в таблице 1.

Таблица 1 - Паспортные данные силового бронестержневого трансформатора ТДЦ-400000/242/15,75

Параметр	Значение
Номинальная мощность, $S_{ном}$ , МВА	400
Номинальное напряжение на ВН, $U_{ВН}$ , кВ	242
Номинальное напряжение на НН, $U_{НН}$ , кВ	15,75
Потери холостого хода, $P_x$ , кВт	200
Потери короткого замыкания, $P_{кз}$ , кВт	850
Ток холостого хода, $I_{xx}$ , %	0,3
Напряжение короткого замыкания, $U_{кз}$ , %	11
Частота, $f$ , Гц	50

Проводим расчёт параметров [1].

Номинальная мощность каждой фазы трансформатора:

$$S_{фном} = \frac{S_{ном}}{3} = \frac{400 \cdot 10^6}{3} = 133333333 \text{ (ВА)}. \quad (2)$$

Фазное напряжение первичной обмотки при соединении «звезда»:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}} = \frac{242 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 139,7 \text{ (кВ)}. \quad (3)$$

Номинальный фазный ток первичной обмотки трансформатора, соединенной по схеме звезда:

$$I_{1фном} = \frac{S_{фном}}{U_{1\phi}} = \frac{133333333}{139,7 \cdot 10^3} = 954 \text{ (А)}. \quad (4)$$

Фазный ток холостого хода трансформатора:

$$I_{x\phi} = \frac{I_{xx} \cdot I_{1фном}}{100} = \frac{0,3 \cdot 954}{100} = 2,862 \text{ (А)}. \quad (5)$$

Полное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения при холостом ходе:

$$Z_x = \frac{U_{1\phi}}{I_{x\phi}} = \frac{139,7 \cdot 10^3}{2,862} = 48812 \text{ (Ом)}. \quad (6)$$

Мощность потерь холостого хода на фазу:

$$P_{x\phi} = \frac{P_x}{3} = \frac{200 \cdot 10^3}{3} = 66667 \text{ (Вт)}. \quad (7)$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos(\varphi_x) = \frac{P_{x\phi}}{U_{1\phi} \cdot I_{x\phi}} = \frac{66667}{139,7 \cdot 10^3 \cdot 2,862} = 0,167. \quad (8)$$

Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$R_m = \frac{Z_x}{\cos(\varphi_x)} = \frac{48812}{0,167} = 292,3 \text{ (кОм)}. \quad (9)$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания:

$$X_m = \frac{Z_x}{\sin(\varphi_x)} = \frac{48812}{\sqrt{1 - 0,166^2}} = 49,5 \text{ (кОм)}. \quad (10)$$

Фазное напряжение короткого замыкания:

$$U_{\kappa\phi} = \frac{U_{1\phi} \cdot U_{\kappa 3}}{100} = \frac{139,7 \cdot 10^3 \cdot 11}{100} = 15,4 \text{ (кВ)}. \quad (11)$$

Полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa\phi}}{I_{1\phi\text{ном}}} = \frac{15,4 \cdot 10^3}{954} = 16 \text{ (Ом)}. \quad (12)$$

Мощность потерь короткого замыкания на фазу:

$$P_{\kappa\phi} = \frac{P_{\kappa 3}}{3} = \frac{850 \cdot 10^3}{3} = 283333 \text{ (Вт)}. \quad (13)$$

Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos(\varphi_k) = \frac{P_{k\phi}}{U_{k\phi} \cdot I_1} = \frac{283333}{15400 \cdot 954} = 0,019. \quad (14)$$

Активное сопротивление короткого замыкания:

$$R_k = Z_k \cdot \cos(\varphi_k) = 16 \cdot 0,019 = 0,304 (\text{Ом}). \quad (15)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_k = Z_k \cdot \sin(\varphi_k) = 16 \cdot \sqrt{1 - 0,019^2} = 16 (\text{Ом}). \quad (16)$$

Базисные условия:

Базисное значения тока:

$$I_{\text{баз}} = I_{1\text{фном}} = 954 (\text{А}). \quad (17)$$

Базисное значение сопротивления:

$$R_{\text{баз}} = \frac{U_{1\phi}}{I_{\text{баз}}} = \frac{139,7 \cdot 10^3}{954} = 146,4 (\text{Ом}). \quad (18)$$

Перевод полученных значений в относительные единицы (индуктивность и активное сопротивление первичной и вторичной обмоток в о.е. будут равны).

Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$R_{m(oe)} = \frac{R_m}{R_{\text{баз}}} = \frac{292300}{146,4} = 1996,6 (\text{о.е.}). \quad (19)$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{m(oe)} = \frac{X_m}{R_{\text{баз}}} = \frac{49500}{146,4} = 338(\text{о.е.}). \quad (20)$$

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$R_{1(oe)} = R_{2(oe)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_k}{R_{\text{баз}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,304}{146,4} = 0,001038(\text{о.е.}). \quad (21)$$

Индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$L_{1(oe)} = L_{2(oe)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_k}{R_{\text{баз}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{146,4} = 0,054644(\text{о.е.}). \quad (22)$$

В системе электроснабжения силовой трансформатор значится нелинейным элементом. Чтобы разобрать измеряемые параметры силового трансформатора при работе его на холостом ходу в программе Matlab используется зависимость потокосцепления ( $\psi$ , Вб) от тока намагничивания ( $i_\mu$ , А) [25].

При подаче напряжения на ввода силового трансформатора, происходит перемещение рабочей точки кривой намагничивания в зону насыщения сердечника. Перемещение точки является источником, приводящим к протеканию в сети больших величин тока намагничивания. На величину тока намагничивания влияет большое количество факторов:

- 1) Фаза включения напряжения.
- 2) Остаточная намагниченность сердечника силового трансформатора.
- 3) Значение потокосцепления в точке излома характеристики намагничивания и наклона характеристики намагничивания в области

насыщения  $L_s$ , который зависит от величины индуктивности air-core inductance  $L_{ac}$  (при полном насыщении магнитопровода его магнитная проницаемость становится близкой к магнитной проницаемости воздуха). Значение  $L_s$  связано с  $L_{ac}$  следующей зависимостью:

$$L_s = L_{as} - L_1, \quad (23)$$

где  $L_1$  - индуктивность первичной обмотки.

Очень сложно точно дать оценку значению  $L_{ac}$ , если отсутствуют, хоть какие-нибудь геометрические параметры силового трансформатора. Однако и при предоставлении производителем конкретного значения  $L_{ac}$  или  $L_s$  не стоит утверждать, что точность, с которой рассчитана данная величина, высока. Ведь во время стандартных испытаний на заводе-изготовителе магнитопровод силового трансформатора не вводят в режим перенасыщения. Что, в свою очередь, при расчёте приведет к погрешности наклона участка кривой намагничивания в области перенасыщения. И, соответственно, значения броска тока на выходе получатся неточные.

Точного критерия, который бы дал однозначный ответ при оценке параметров кривых намагничивания, не существует. Поэтому приходится работать с примерными диапазонами значений этих параметров. К примеру, вне зависимости от мощности силового трансформатора, индуктивность его  $L_{ac} = 0,16 \div 0,20$  о. е.,  $L_s$  рекомендуют принимать равной удвоенному значению напряжения (индуктивности) короткого замыкания в относительных единицах. Точка излома же характеристики намагничивания имеет значение в пределах 1,1-1,2 о. е. Характеристика намагничивания в модели задается как кусочно-линейная зависимость между потокосцеплением сердечника и током намагничивания [21].

Расчёт координат характерных точек кривой намагничивания.

Для первой точки:  $\psi_1 = i_{\mu 1} = 0$  о.е.

Для остальных точек рассчитаем соответствующие значения тока и потокосцепления. Потокосцепление второй точки принимаем:  $\psi_2 = 1,15$  о.е. Коэффициент потокосцепления принимаем  $\kappa_n = 25 \div 30$ . Ток намагничивания во второй точке:

$$i_{\mu 2} = \frac{\psi_2 \cdot \kappa_n}{L_{m(oe)}} = \frac{1,15 \cdot 27,5}{338} = 0,094 \text{ (о.е.)}. \quad (24)$$

Индуктивность трансформатора:

$$L_{ac} = 2 \cdot \frac{U_{кз}}{100} = 2 \cdot \frac{11}{100} = 0,22 \text{ (о.е.)}. \quad (25)$$

Наклон характеристики в области насыщения:

$$SlopeL_s = L_{ac} - L_1 = 0,22 - 0,054 = 0,166 \text{ (о.е.)}. \quad (26)$$

Потокосцепление в третьей точке:

$$\psi_3 = \psi_2 + SlopeL_s = 1,15 + 0,166 = 1,316 \text{ (о.е.)}. \quad (27)$$

Ток намагничивания в третьей точке:

$$i_{\mu 3} = 1 \text{ (о.е.)}. \quad (28)$$

Сведём координаты точек в таблицу 2.

Таблица 2 – Координаты точек кривой намагничивания

Характерная точка	$\psi$ , о.е.	$i_\mu$ , о.е.
1	0	0
2	1,15	0,094
3	1,316	1
4	1,35	3

На рисунке 38 показана кривая намагничивания силового трансформатора ТДЦ-400000/242/15,75. Также добавлена четвёртая точка, сделано это было для того, чтобы ограничить насыщение.

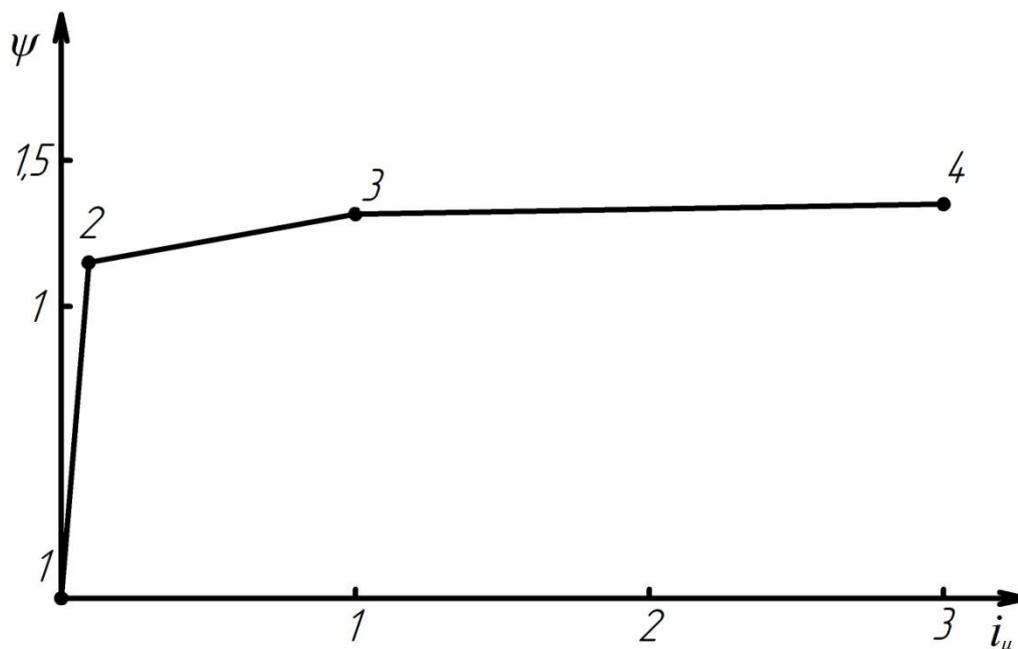


Рисунок 38 – Кривая намагничивания трансформатора ТДЦ-400000/242/15,75

Для моделирования токов намагничивания в присутствии постоянных токов собрали схему, изображенную на рисунке 39.

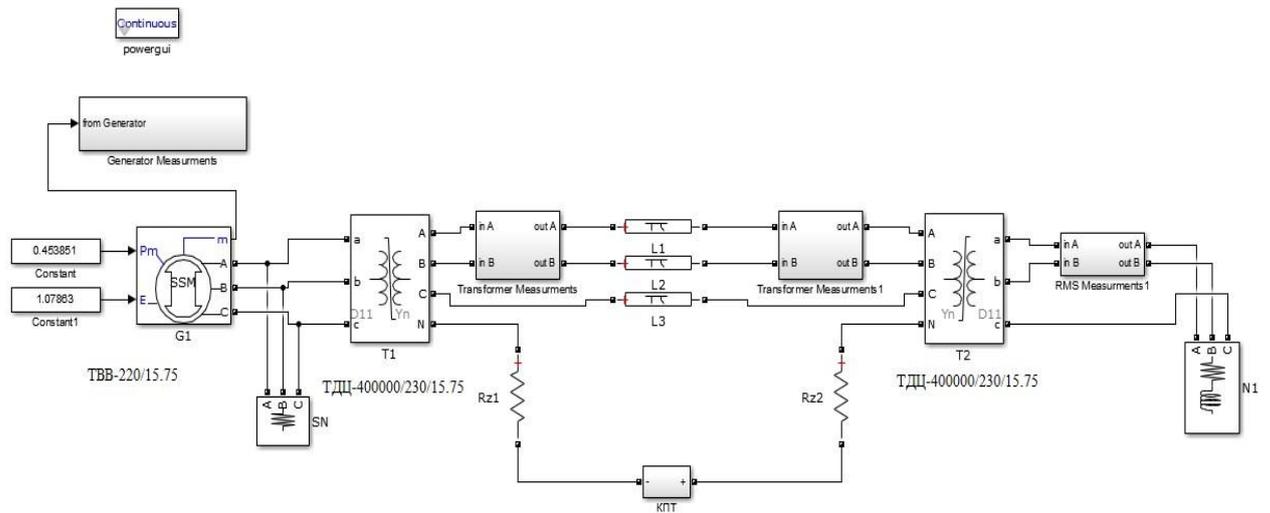


Рисунок 39 – Схема моделирования токов намагничивания в бронестержневом трансформаторе

### 3.3 Анализ полученных данных для бронестержневого трансформатора

В результате моделирования получили следующие результаты:

- 1) График значения тока в нейтралях трансформаторов.
- 2) График действительного значения напряжения, рабочего тока и тока намагничивания для повышающего трансформатора.
- 3) График действительного значения напряжения, рабочего тока и тока намагничивания для понижающего трансформатора.

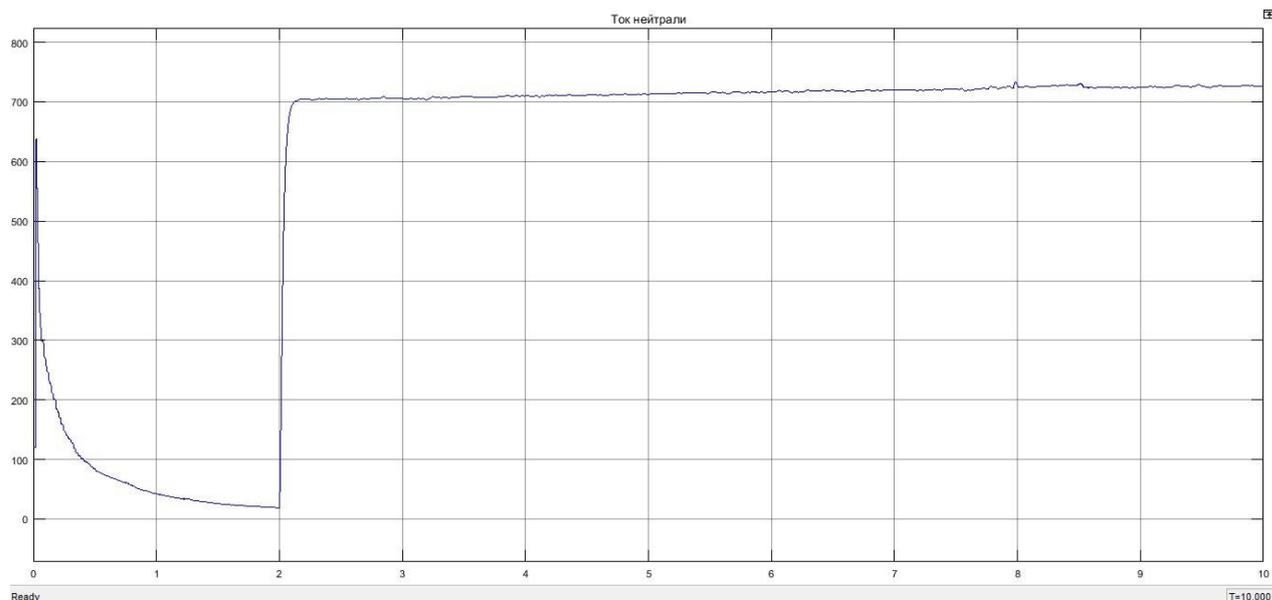


Рисунок 40 – Действительное значение тока в нейтральных трансформаторов

На рисунке 40 наблюдаем, как через 2 секунды после начала работы схемы, ток резко возрастает. Это происходит потому, что в схеме было задано включение источника напряжения в нейтральных трансформаторов через 2 секунды после начала записи работы схемы.

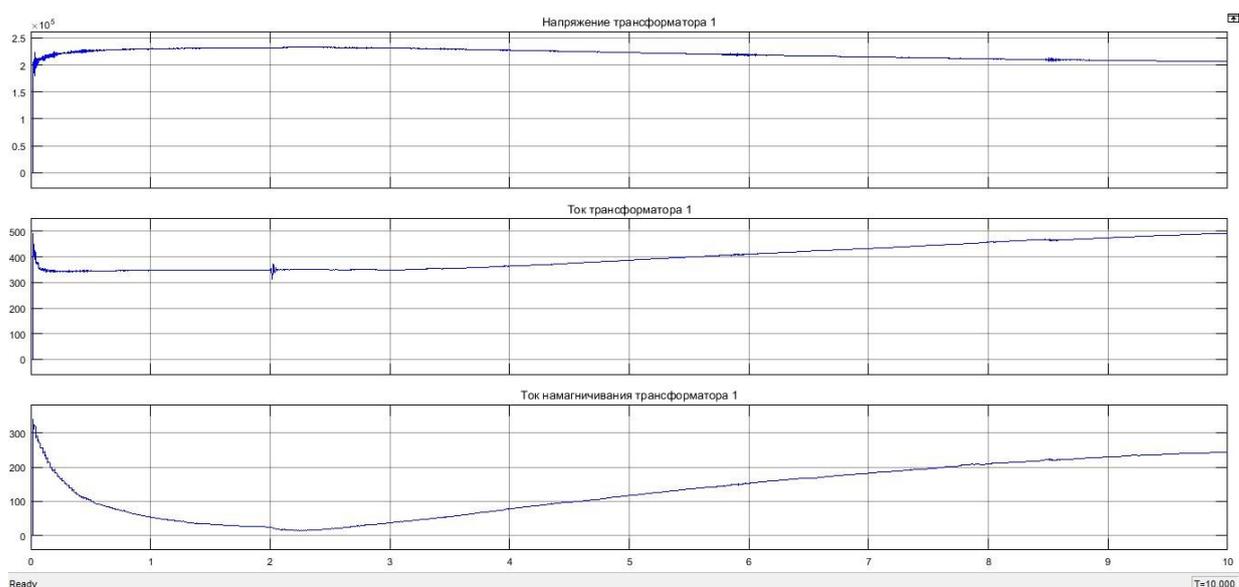


Рисунок 41 – Действительные значения напряжения, рабочего тока и тока намагничивания повышающего трансформатора

На рисунке 41 ток намагничивания повышающего трансформатора начинает увеличиваться через 2,5 секунды после начала записи работы схемы. Объяснить это можно тем, что в момент времени 2 секунды трансформатор был ненасыщен. За 0,5 секунды рабочая точка кривой намагничивания трансформатора начала смещаться в область насыщения и началось увеличение тока намагничивания.

Рабочий ток в момент времени 2 секунды имеет небольшое возмущение, после которого плавно начинает возрастать.

У напряжения же в момент времени 2 секунды никаких возмущений не наблюдается, но затем происходит постепенное его просаживание.

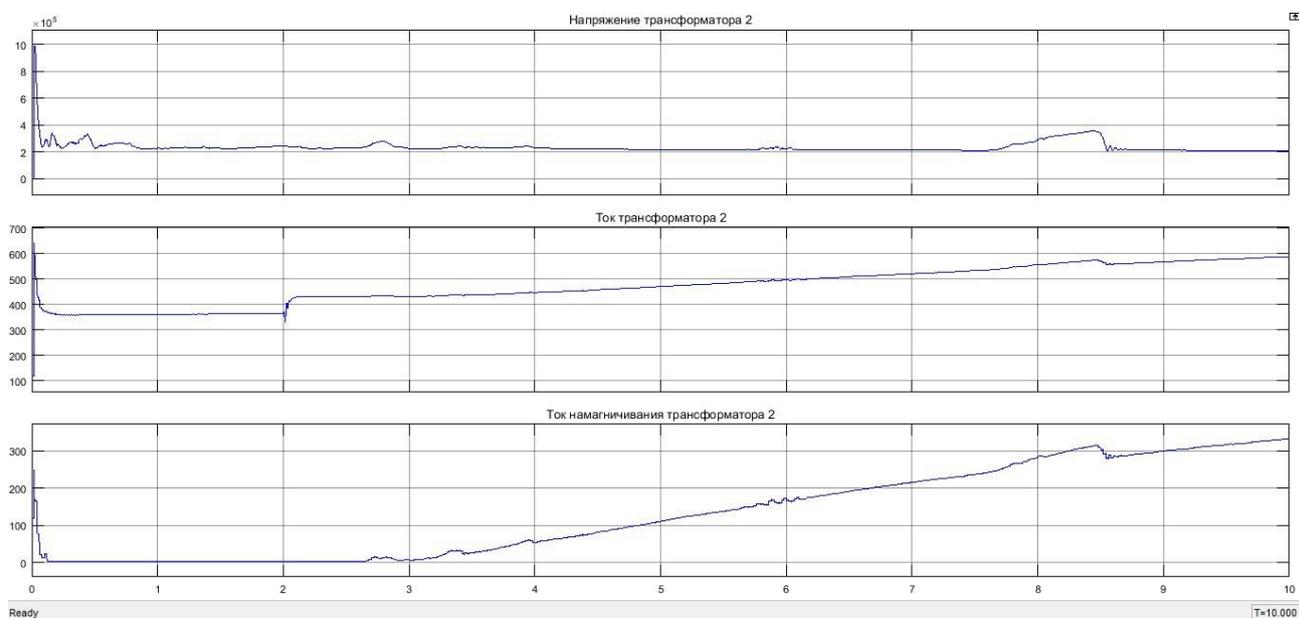


Рисунок 42 - Действительные значения напряжения, рабочего тока и тока намагничивания понижающего трансформатора

На рисунке 42 ток намагничивания у понижающего трансформатора не имеет возмущений в момент времени 2 секунды. Но у этого тока гораздо резче увеличивается амплитуда.

Рабочий ток имеет в момент времени 2 секунды возмущение большее, чем у повышающего трансформатора. Также плавно его амплитуда затем увеличивается.

Напряжение понижающего трансформатора практически не изменяется, за исключением пары мест резкого возрастания амплитуды.

### **3.4 Компьютерное моделирование токов намагничивания в стержневых трансформаторах при протекании постоянных токов в системе электроснабжения**

Также как и бронестержневого, проведём расчёт параметров стержневого трансформатора ТРДНЦ-200000/230/11, паспортные данные которого указаны в таблице 3.

Таблица 3 - Паспортные данные силового стержневого трансформатора ТРДНЦ-200000/230/11

Параметр	Значение
Номинальная мощность, $S_{ном}$ , МВА	200
Номинальное напряжение на ВН, $U_{ВН}$ , кВ	230
Номинальное напряжение на НН, $U_{НН}$ , кВ	11
Потери холостого хода, $P_x$ , кВт	100
Потери короткого замыкания, $P_{кз}$ , кВт	630
Ток холостого хода, $I_{xx}$ , %	0,3
Напряжение короткого замыкания, $U_{кз}$ , %	12,5
Частота, $f$ , Гц	50

Проводим расчёт параметров.

Номинальная мощность каждой фазы трансформатора:

$$S_{\text{фном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{3} = \frac{200 \cdot 10^6}{3} = 66666666,7 \text{ (ВА)}. \quad (29)$$

Фазное напряжение первичной обмотки при соединении «звезда»:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{230 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 132,8 \text{ (кВ)}. \quad (30)$$

Номинальный фазный ток первичной обмотки трансформатора, соединенной по схеме звезда:

$$I_{1\phi\text{ном}} = \frac{S_{\text{фном}}}{U_{1\phi}} = \frac{66666666,7}{132,8 \cdot 10^3} = 502 \text{ (А)}. \quad (31)$$

Фазный ток холостого хода трансформатора:

$$I_{x\phi} = \frac{I_{xx} \cdot I_{1\phi\text{ном}}}{100} = \frac{0,3 \cdot 502}{100} = 1,506 \text{ (А)}. \quad (32)$$

Полное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения при холостом ходе:

$$Z_x = \frac{U_{1\phi}}{I_{x\phi}} = \frac{132,8 \cdot 10^3}{1,506} = 88181 \text{ (Ом)}. \quad (33)$$

Мощность потерь холостого хода на фазу:

$$P_{x\phi} = \frac{P_x}{3} = \frac{100 \cdot 10^3}{3} = 33333 \text{ (Вт)}. \quad (34)$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos(\varphi_x) = \frac{P_{x\phi}}{U_{1\phi} \cdot I_{x\phi}} = \frac{33333}{132,8 \cdot 10^3 \cdot 1,506} = 0,167. \quad (35)$$

Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$R_m = \frac{Z_x}{\cos(\varphi_x)} = \frac{88181}{0,167} = 528,03 \text{ (кОм)}. \quad (36)$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания:

$$X_m = \frac{Z_x}{\sin(\varphi_x)} = \frac{88181}{\sqrt{1 - 0,167^2}} = 89,4 \text{ (кОм)}. \quad (37)$$

Фазное напряжение короткого замыкания:

$$U_{\kappa\phi} = \frac{U_{1\phi} \cdot U_{\kappa 3}}{100} = \frac{132,8 \cdot 10^3 \cdot 12,5}{100} = 16,6 \text{ (кВ)}. \quad (38)$$

Полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa\phi}}{I_{1\phi\text{ном}}} = \frac{16,6 \cdot 10^3}{502} = 33,07 \text{ (Ом)}. \quad (39)$$

Мощность потерь короткого замыкания на фазу:

$$P_{\kappa\phi} = \frac{P_{\kappa\Delta}}{3} = \frac{630 \cdot 10^3}{3} = 210000 \text{ (Вт)}. \quad (40)$$

Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos(\varphi_{\kappa}) = \frac{P_{\kappa\phi}}{U_{\kappa\phi} \cdot I_1} = \frac{210000}{16600 \cdot 502} = 0,025. \quad (41)$$

Активное сопротивление короткого замыкания:

$$R_{\kappa} = Z_{\kappa} \cdot \cos(\varphi_{\kappa}) = 33,07 \cdot 0,025 = 0,827 \text{ (Ом)}. \quad (42)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{\kappa} = Z_{\kappa} \cdot \sin(\varphi_{\kappa}) = 33,07 \cdot \sqrt{1 - 0,025^2} = 33,06 \text{ (Ом)}. \quad (43)$$

Базисные условия:

Базисное значение тока:

$$I_{\text{баз}} = I_{1\text{фном}} = 502 \text{ (А)}. \quad (44)$$

Базисное значение сопротивления:

$$R_{\text{баз}} = \frac{U_{1\phi}}{I_{\text{баз}}} = \frac{132,8 \cdot 10^3}{502} = 264,5 \text{ (Ом)}. \quad (45)$$

Перевод полученных значений в относительные единицы (индуктивность и активное сопротивление первичной и вторичной обмоток в о.е. будут равны).

Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$R_{m(oe)} = \frac{R_m}{R_{\text{баз}}} = \frac{528030}{264,5} = 1996,3 \text{ (о.е.)}. \quad (46)$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{m(oe)} = \frac{X_m}{R_{\text{баз}}} = \frac{89400}{264,5} = 337 \text{ (о.е.)}. \quad (47)$$

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$R_{1(oe)} = R_{2(oe)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\kappa}}{R_{\text{баз}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,827}{264,5} = 0,00156 \text{ (о.е.)}. \quad (48)$$

Индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$L_{1(oe)} = L_{2(oe)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_{\kappa}}{R_{\text{баз}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{33,06}{264,5} = 0,0625 \text{ (о.е.)}. \quad (49)$$

Расчёт координат характерных точек кривой намагничивания для стержневого трансформатора проводим точно по такому же способу, как и для бронестержневого трансформатора.

Для первой точки:  $\psi_1 = i_{\mu 1} = 0 \text{ о.е.}$

Для остальных точек рассчитаем соответствующие значения тока и потокосцепления. Потокосцепление второй точки принимаем:  $\psi_2 = 1,15 \text{ о.е.}$

Коэффициент потокосцепления принимаем  $\kappa_n = 25 \div 30$ . Ток намагничивания во второй точке:

$$i_{\mu 2} = \frac{\psi_2 \cdot \kappa_n}{L_{m(oe)}} = \frac{1,15 \cdot 27,5}{337} = 0,094 (\text{о.е.}), \quad (51)$$

Индуктивность трансформатора:

$$L_{ac} = 2 \cdot \frac{U_{\kappa 3}}{100} = 2 \cdot \frac{12,5}{100} = 0,25 (\text{о.е.}). \quad (52)$$

Наклон характеристики в области насыщения:

$$SlopeL_s = L_{ac} - L_1 = 0,25 - 0,0625 = 0,1875 (\text{о.е.}). \quad (53)$$

Потокосцепление в третьей точке:

$$\psi_3 = \psi_2 + SlopeL_s = 1,15 + 0,1875 = 1,3375 (\text{о.е.}). \quad (54)$$

Ток намагничивания в третьей точке:

$$i_{\mu 3} = 1 (\text{о.е.}). \quad (55)$$

Сведём координаты точек в таблицу 4.

Таблица 4 – Координаты точек кривой намагничивания

Характерная точка	$\psi$ , о.е.	$i_\mu$ , о.е.
1	0	0
2	1,15	0,094
3	1,3375	1
4	1,35	3

На рисунке 43 показана кривая намагничивания силового трансформатора ТРДНЦ-200000/230/11. Также была добавлена четвёртая точка, сделано это было для того, чтобы ограничить насыщение.

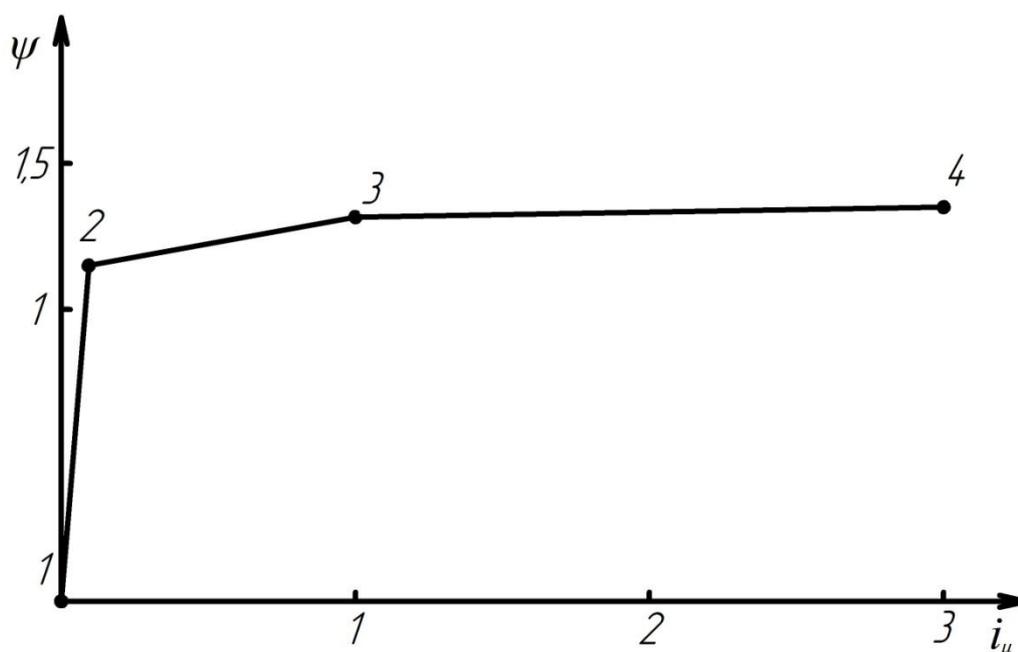


Рисунок 43 – Кривая намагничивания трансформатора ТРДНЦ-200000/230/11

Для моделирования постоянных токов в программе Matlab собрали схему, изображенную на рисунке 44.

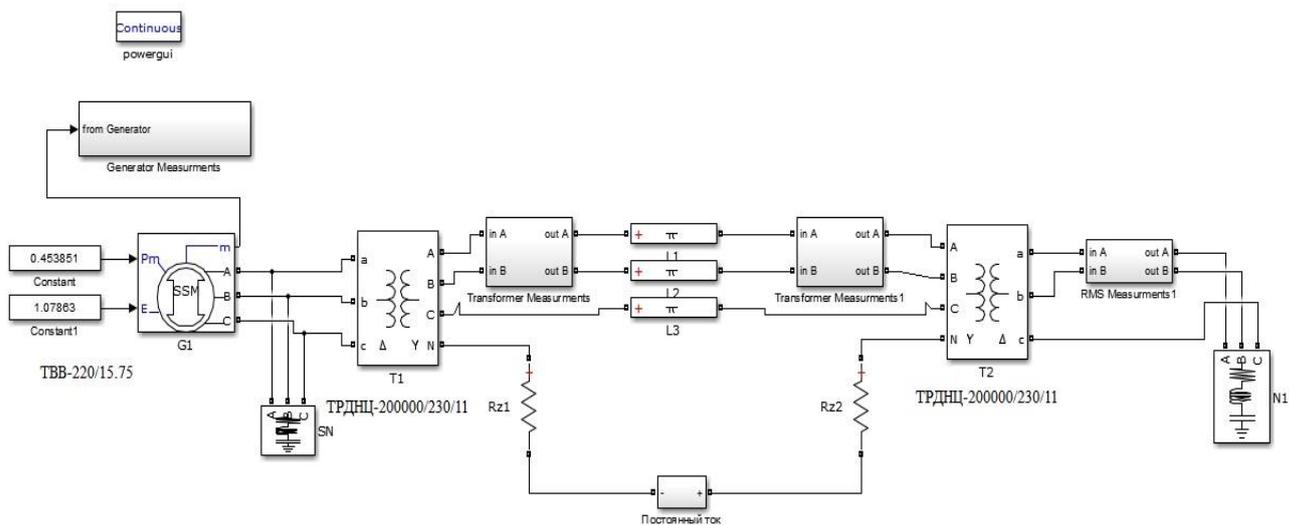


Рисунок 44 – Схема моделирования постоянного тока в сети со стержневыми трансформаторами

### 3.5 Анализ полученных данных для стержневого трансформатора

В результате моделирования получили следующие результаты:

В результате моделирования получили следующие результаты:

- 1) График значения тока в нейтральных трансформаторов.
- 2) График действительного значения напряжения, рабочего тока и тока намагничивания для повышающего трансформатора.
- 3) График действительного значения напряжения, рабочего тока и тока намагничивания для понижающего трансформатора.

На рисунке 45 наблюдаем, такую же картину, как и в моделировании бронестержневого трансформатора. Через 2 секунды после начала работы схемы, ток резко возрастает на заданную величину.

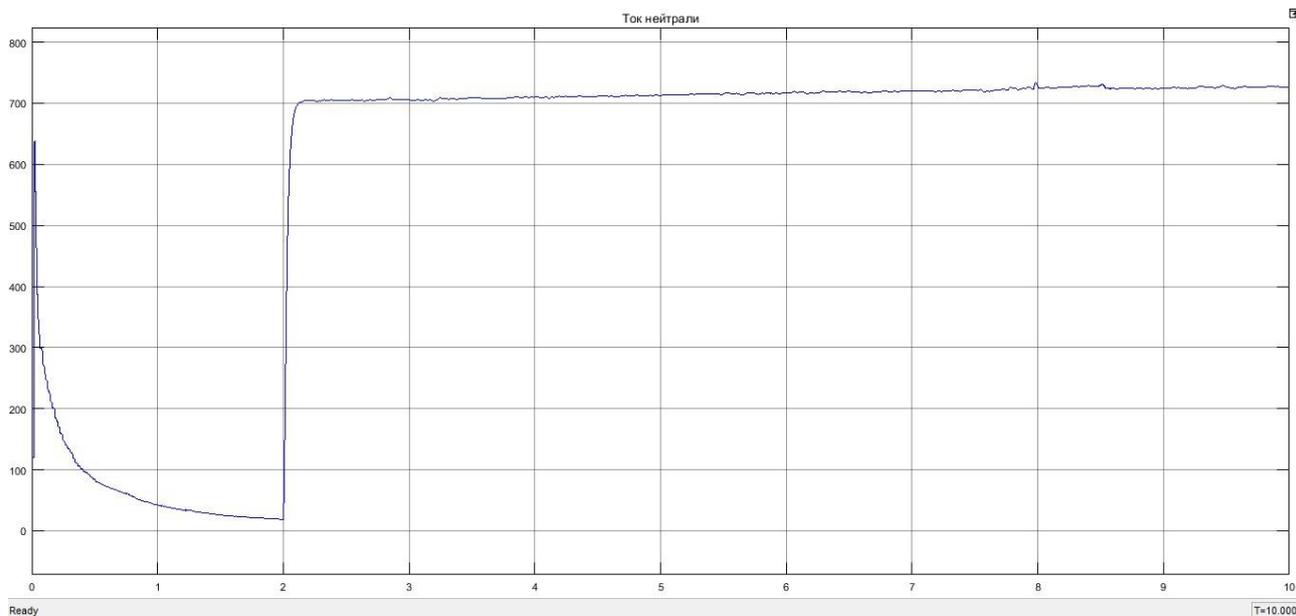


Рисунок 45 – Действительное значение постоянного тока в нейтралях трансформаторов

На рисунке 46 ток намагничивания повышающего трансформатора начинает увеличиваться только через 3 секунды после начала моделирования, и, соответственно, через 1 секунду после включения постоянного тока в нейтралях трансформаторов. Объясняется это аналогично, как и у бронестержневого трансформатора. У стержневого трансформатора рабочая точка кривой намагничивания трансформатора начала смещаться в область насыщения только через 1 секунду после включения постоянного тока и началось увеличение тока намагничивания. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что рабочая точка стержневого трансформатора находится ниже рабочей точки бронестержневого трансформатора.

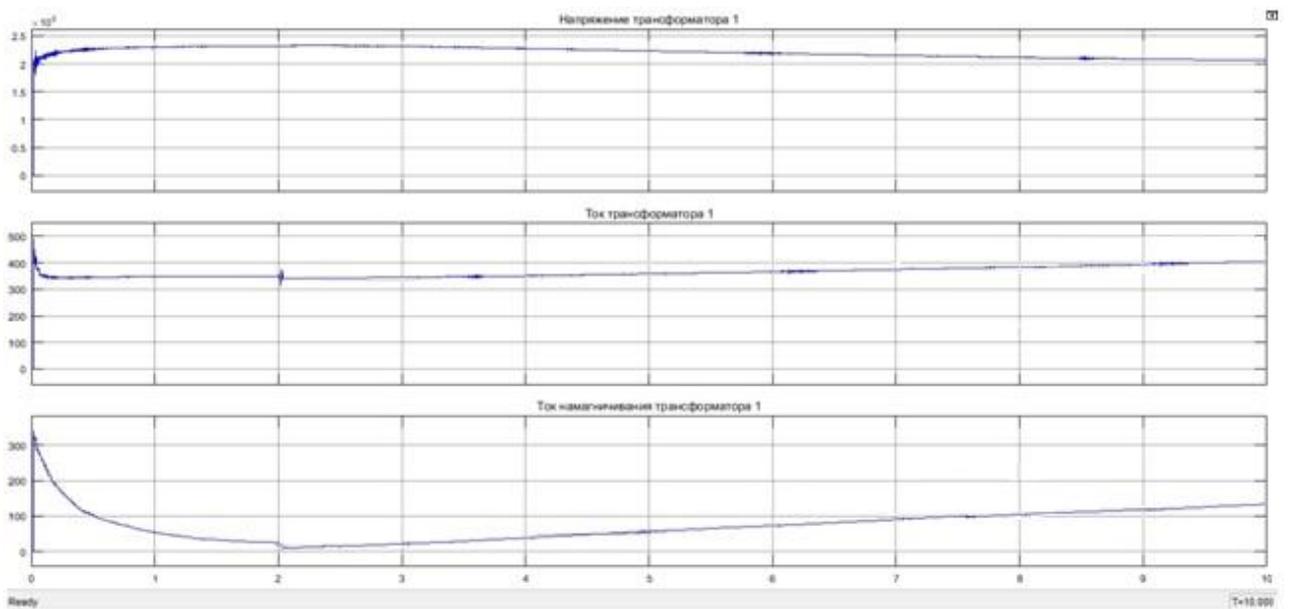


Рисунок 46 – Действительные значения напряжения, рабочего тока и тока намагничивания повышающего трансформатора

Рабочий ток трансформатора в момент времени 2 секунды также имеет небольшое возмущение, после которого плавно начинает возрастать, но увеличение проходит на величину меньшую, чем у бронестержневого трансформатора.

У напряжения же в момент времени 2 секунды никаких возмущений не наблюдается, но затем происходит постепенное его просаживание. От графика бронестержневого трансформатора практически не отличается.

На рисунке 47 ток намагничивания у понижающего трансформатора не имеет возмущений в момент времени 2 секунды. Увеличиваться ток намагничивания начинается также после 3 секунды начала моделирования. Увеличение происходит плавное и также на величину меньшую, чем у соответствующего бронестержневого трансформатора.

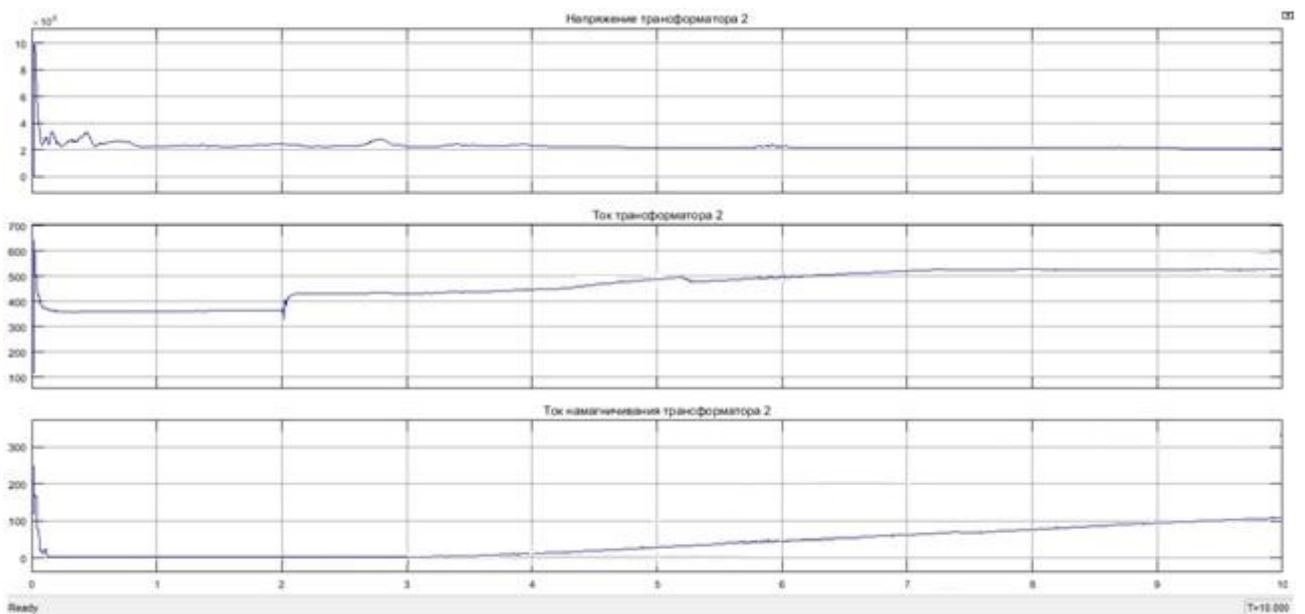


Рисунок 47 - Действительные значения напряжения, рабочего тока и тока намагничивания понижающего трансформатора

Рабочий ток имеет в момент времени 2 секунды возмущение большее, чем у повышающего трансформатора. Затем примерно на 5 секунде имеется небольшой скачок, после которого на 7 секунде увеличение тока прекращается.

Напряжение понижающего трансформатора практически не изменяется, за исключением пары мест резкого возрастания амплитуды.

## Заключение

Разработана методика расчёта токов намагничивания силовых трансформаторов при протекании постоянных токов в системе электроснабжения.

На основании анализов процессов, протекающих на Солнце, определили механизм возникновения постоянных токов в нейтралях силовых трансформаторах.

На основании подробного разбора принципа действия силового трансформатора и его конструкции определили, что для моделирования двухобмоточного трансформатора в программной среде MATLAB необходимо использовать T-образную схему.

После сбора схемы в программной среде MATLAB смоделировали протекание постоянного тока через нейтралы силовых бронестержневых трансформаторов, а также через шунтовые резисторы с помощью источника постоянного напряжения 5 В. У повышающего и понижающего трансформатора ток намагничивания переходит в режим перенасыщения, тем самым в трансформаторах возникают гармоники кратные трём, которые приводят к нагреву трансформатора, понижению рабочего напряжения и тока.

Затем провели моделирования протекания постоянного тока в нейтралях силовых стержневых трансформаторах с постоянным напряжением 5 В. Величины токов намагничивания в моделировании стержневых трансформаторах меньше соответствующих величин бронестержневых трансформаторов. Как уже было сказано, такие результаты получились из-за того, что рабочая точка стержневого трансформатора находится ниже рабочей точки бронестержневого трансформатора. Тем самым можно сказать, что для перехода в режим перенасыщения для стержневого трансформатора понадобится величина постоянного тока гораздо большая, чем для бронестержневого трансформатора. Т.е. Бронестержневой трансформатор гораздо менее устойчив к влиянию внешних постоянных токов, которые могут

протекать в его нейтрали, и возникающих под влиянием внешних изменяющихся электрических полей.

Таким образом, в собранной схеме наглядно продемонстрировано влияние протекания постоянных токов в системе электроснабжения на величину токов намагничивания силовых трансформаторов.

## Список использованной литературы

1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л.А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2006. – 638 с.
2. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.
3. Вахнина, В.В. Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях: монография / В.В. Вахнина. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 104 с.
4. Вахнина, В.В. Тепловая нагрузка бака силового трансформатора при глубоком насыщении магнитной системы / В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, В.А. Шаповалов, Д.А. Кретов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 4 (17). – С. 21 – 33.
5. Вахнина, В.В. Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, В.А. Кузнецов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – № 3(21). – С. 65 – 69.
6. Вахнина, В.В. Влияние геоиндуцированных токов на увеличение тепловых потерь в обмотках силового трансформатора от вихревых токов / В.В. Вахнина, Д.А. Кретов // Научная дискуссия: инновации в технических, естественных, математических и гуманитарных науках : материалы III Международной заочной научно-практической конференции : в 2 ч. – М.: Изд-во «Международный центр науки и образования», 2012. – Ч.1. – С. 39 – 46.
7. Вахнина, В.В. Влияние геомагнитных индуцированных токов на работу силовых трансформаторов / В.В. Вахнина, В.А. Кузнецов // Энергетика глазами молодежи : сборник докладов III Международной научно-технической конференции : в 2 т. – Екатеринбург, 2012. – Т.2. – С. 351 – 354.
8. Вахнина, В.В. Насыщение магнитной системы силовых трансформаторов при геомагнитных бурях / В.В. Вахнина, В.А. Шаповалов //

Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сборник трудов IV Международной научно-технической конференции: в 2 ч. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – Ч.2. – С. 20 – 25.

9. Вахнина, В.В. Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях : монография / В.В. Вахнина. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. – 104 с.

10. Вахнина, В.В. Влияние геоиндуцированных токов на тепловой режим силовых трансформаторов / В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, В.А. Шаповалов // Электротехника. – 2016. – № 1. – С.56-64.

11. Вахнина, В.В. Влияние возмущений космической погоды на баланс реактивной мощности в системе электроснабжения асинхронной нагрузки / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко // Промышленная энергетика. – 2016. – №1. – С.39-49.

12. Вахнина, В.В. Влияние геомагнитной активности на мощность намагничивания силовых трансформаторов электрических сетей / В.В. Вахнина, А.А.Кувшинов, А.Н. Черненко // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – №2. – С.8 – 14.

14. Вахнина, В.В. Оценка уязвимости систем электроснабжения различной топологии к геомагнитным возмущениям / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, О.В. Самолина, А.А. Козуб // Промышленная энергетика. – 2016. – №8. – С.16-23.

15. Вахнина, В.В. Насыщение магнитной системы силового однофазного автотрансформатора квазипостоянными токами / В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, В.А. Шаповалов, О.В. Самолина // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – №5. – С.28 – 32.

16. Вахнина, В.В. Пропускная способность электропередачи в условиях геомагнитной активности / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.Д. Селемир, В.И. Карелин // Электричество. – 2016. – №9. – С. 4-14.

17. Вахнина, В.В. Кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания силового трансформатора для оценки интенсивности воздействия квазипостоянных токов / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, М.П. Крюковский // Промышленная энергетика. – 2017. – №1. – С.37-42.

18. Вахнина, В.В. Моделирование процессов насыщения магнитной системы силового трансформатора при одновременном протекании по обмотке переменного и постоянного токов / В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, В.А. Шаповалов, О.В. Самолина // Электротехника. – 2017. – №4. – С.54-59.

19. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений / А.И. Вольдек. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.

20. ГОСТ 11677 – 85. Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые. Общие технические требования. – Введ. 1986-01-07. – М. : ИПК изд-во стандартов, 2002. – 39 с.

21. ГОСТ 14209 – 97. Руководство по нагрузке силовых трансформаторов. Межгосударственный стандарт. – Введ. 2002-01-01. – Минск : Изд-во стандартов, 2001. – 76 с.

22. Гуревич, В.И. Силовые трансформаторы тоже подвержены влиянию Солнца / В.И. Гуревич. // Электротехнический рынок. – 2011. – № 5(41). – С.74 – 77.

23. Зюзин, М.О. Разработка компьютерной модели системы электроснабжения в присутствии квазипостоянных токов / М.О. Зюзин, М.П. Крюковский // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю.Абдуллазянова. В 3 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 339 с.

24. Зюзин, М.О. Программная реализация режимов работы систем электроснабжения в присутствии нелинейных элементов / М.О. Зюзин, А.А. Кабанов, М.П. Крюковский, В.В. Вахнина, А.Н. Черненко // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистров,

аспирантов (Тольятти, 12-14 апреля 2016 года): сборник трудов / отв. за вып. В.В. Вахнина. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. – 415 с.

25. Кабанов, А.А. Исследование влияния геомагнитных бурь на насыщение силовых трансформаторов с различной конструкцией магнитных систем / А.А. Кабанов, М.О. Зюзин // Энергетика. Проблемы и перспективы: сборник трудов первой региональной студенческой конференции. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015.– С. 88 – 100 экз.

26. Кабанов, А.А. Исследование влияния интенсивности геомагнитных бурь на насыщение силовых трансформаторов с различной конструкцией магнитных систем / А.А. Кабанов, М.П. Крюковский, В.В. Вахнина // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистров, аспирантов (Тольятти, 12-14 апреля 2016 года): сборник трудов / отв. за вып. В.В. Вахнина. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. – 415 с.

27. Кабанов, А.А. Влияние воздействия геомагнитной бури на силовые трансформаторы различной конструкции магнитной системы / А.А. Кабанов, М.О. Зюзин // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 3 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 339 с.

28. Крюковский, М.П. Оценка влияния квазипостоянных токов на электропередачу в системах электроснабжения / М.П. Крюковский, А.А. Кабанов, В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов : IV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов (Тольятти, 12-14 апреля 2016 года) : сборник трудов / отв. за вып. В.В. Вахнина. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – 415 с.

29. Крюковский, М.П. Влияние квазипостоянных токов на пропускную способность линии электропередачи / М.П. Крюковский, А.А. Кабанов // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции

«Тинчуринские чтения» / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 3 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 339 с.

30. Кувшинов, А.А. Аналитическая модель эмиссии гармоник тока намагничивания силовым трансформатором при воздействии квазипостоянных токов / А.А. Кувшинов, В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, Т.А. Рыбалко // Электротехника. – 2017. – №5. – С.25-31.

31. Новаш И.В. Расчёт параметров модели трёхфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учётом насыщения магнитопровода: статья / К.т.н. доцент Новаш И.В., асп. Румянцев Ю.В.: Белорусский национальный технический университет, 2014. – 13с .

32. Петров, Г.Н. Электрические машины: учебник для вузов / Г.Н. Петров.: – изд. Энергия, 1974. – 241 с.

33. Силовые трансформаторы: справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

34. Скопинцев, В.А. Влияние космических факторов на повреждаемость в электрических сетях / В.А. Скопинцев, Д.В. Маркитанов // Энергетик. – 2012. – № 10. – С. 8 – 11.

35. Смоленцев, Н.К. MATLAB: программирование на Visual C#, Borland C#, JBuilder, VBA / Н.К. Смоленцев. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 464 с.

36. Справочник по магнитным и электрическим свойствам горячекатаной электротехнической стали / В.В. Дружинин, А.З. Векслер, Л.К. Куренных. – М. : Изд-во стандартов, 1971. – 127 с.

37. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов : уч. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. – 4-е изд., перераб. – М. : Энергия, 2014. – 544 с.

38. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 290 с.

39. Чижишин, Л.П. О влиянии геомагнитных бурь на электрические сети крайнего Севера : тр. Красноярского Политехнического института / Л.П. Чижишин. – Красноярск, 1978. – С. 214 – 219.

40. Чистяков, Г.Н. Экспериментальное исследование тока в нейтрали трансформатора в период геомагнитных бурь / Г.Н. Чистяков, С.Н. Сигаев // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т.318. – № 4 (Энергетика). – С. 122 – 127.
41. Шкуропат, И.А. Уравнения напряжения и схема замещения трансформатора / И.А. Шкуропат // Электро. – 2004. – № 4. – С. 21 – 25.
42. Электрические машины : Трансформаторы: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б.Н. Сергеенков, В.М. Киселев, Н.А. Акимова; под ред. И.П. Копылова. – М. : Высшая школа, 2013. – 352 с.
43. Электрические системы. Электрические сети : учеб. пособие для студентов электроэнерг. спец. вузов / под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – М. : Высшая школа, 2011. – 511 с.
44. Albertson, V.D. Geomagnetic disturbance cause and power systems effects / V.D. Albertson // IEEE PES Meeting, Long Beach, CA. –1989. – № 7. – P. 3 – 9.
45. Attaway, S. MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving / S. Attaway. – 2nd ed. – Butterworth-Heinemann, 2011. – 544 p.
46. Babayev, E.S. Geomagnetic storm risks to electric power distribution and supply systems at midlatitude locations and their vulnerability from space weather / E.S. Babayev // Technical and Physical problems in Power Engineering, Gazy University, Ankara. – P. 1097 – 1104.
47. Kappenman, J.G. Advanced Geomagnetic Storm Forecasting: A Risk Management Tool for Electric Power Operations / J.G. Kappenman // IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Space Plasmas. – 2000. – Vol. 28. – № 6. – P. 2114 – 2121.
48. Kappenman, J.G. Application of Modeling Techniques to Assess Geomagnetic Induced Current Risks on the NGC Transmission System / J.G. Kappenman // CIGRE, Session 2002. – P. 39 – 304.
49. Kappenman, J.G. Geomagnetic storms and Their Impact on Power Systems: Lessons Learned from Solar Cycle 22 and the Outlook for Solar Cycle 23 / J.G. Kappenman // IEEE Power Engineering Review. – 1996. – № 5. – P. 5 – 8.

50. Ko, C.-D. Analysis of cor-form transformer performance under the effects of geomagnetically induced currents / C.-D. Ko, R.S. Girgis // Proceeding of the American Power Conference. Vol. 54. Pt2. 53<sup>rd</sup> Annu. Meet., Chicago (Ill), 1992. – P. 1122 – 1125.

51. Koskinen, H. Space weather effect cataloguer / H. Koskinen, E. Tanskanen, R. Pirjola, A. Pulkkinen, C. Dyer, D. Rodgers, P. Cannon, J.-C. Mandeville, D. Boshier. ESWS-FMI-RP-0001, 2001. – p. 41

52. Lahtinen, M. GIC occurrences and GIC tests for 400 kV system transformer / M. Lahtinen, J. Elovaara // IEEE Transactions on Power Delivery, 17, 2002. – P. 555 – 561.

53. Vakhnina, V.V. The effect of geomagnetically induced currents on the thermal conditions of power transformers / V.V. Vakhnina, V.N. Kuznetsov, V.A. Shapovalov // Russian Electrical Engineering. - 2016. - 87(1). - pp. 53-58.

54. Walling, R.A. Characteristics of transformer exciting – current during geomagnetic disturbances / R.A. Walling, A.N. Kahn // IEEE Trans. Power. Deliv. – 1991. – 6. – №4. – P. 1707 – 1713.