

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

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

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

Электромеханика
(направленность (профиль))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Неуправляемый шунтирующий однофазный реактор
РОМ-60000/500»

Студент(ка)

А.А. Густилин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.В. Ермаков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

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

« ____ » _____ 2016 г.

Тольятти 2016

Аннотация

В выпускной квалификационной работе разработан силовой масляный реактор РОМ-60000/500 с использованием современных методик проектирования. В пояснительной записке к дипломному проекту представлено обоснование выбора размеров стержня и вытекающих из него остальных главных размеров. Электромагнитный расчет выполнен вручную. В электромагнитном расчете проведено нахождение необходимой индуктивности a на основании её и мощности выбор размеров стержня магнитной системы, расчет вольт-витка обмотки СО, общего количества витков во всех катушках обмотки СО, напряжения и тока в обмотке СО, произведен выбор типа обмотки СО, рассчитаны ее основные параметры, рассчитаны основные параметры работы – потери и ток при режиме холостого хода, потери и напряжение при режиме короткого замыкания, в разделе «Тепловой расчет» произведены расчеты превышения температуры обмоток реактора над воздухом и маслом, рассчитано количество охладителей; проведен тепловой расчет; произведен расчет динамической стойкости реактора при коротком замыкании, в котором рассчитаны механические напряжения в обмотках от радиальных сил и осевых сил и проведена проверка механической прочности обмоток. В технологической части представлены описания радиально шихтованных и эвольвентных стержней; в экономической части проекта выполнено сравнение с ценой замены линии.

Пояснительная записка содержит 48 листах. Графическая часть проекта представлена 6 чертежами формата А1.

Содержание

Введение	4
1. Состояние вопроса	8
1.1 Компенсация реактивной мощности	8
1.2 Создание преобразователей энергии	16
2 Расчет параметров реактора	20
2.1 Основы выбора реактора	20
2.2 Расчет параметров реактора	21
2.2.1 Расчет индуктивности реактора	21
2.2.2 Расчет основных размеров реактора	21
2.2.3 Параметры режима короткого замыкания	25
2.2.4 Параметры холостого хода	29
2.2.5 Тепловой расчет	30
2.2.6 Расчет динамической стойкости обмоток при режиме короткого замыкания	33
2.2.7 Выбор расширителя	36
3 Технологическая часть	38
3.1 Особенности радиально шихтованного и эвольвентного стержня реактора	38
3.2 Включение реактора в сеть высоковольтных линии	40
3.3 инженерные расчеты	41
3.3.1 Расчет освещения участка сборки остова реактора	41
3.3.2 Расчет заземления участка сборки остова реактора	43
3.4 Экономическое обоснование	45
Заключение	46
Список использованных источников	47

Введение

При распространении и целевом распределении электрической энергии, управляющих аппаратах, автоматических системах и связи широко применяются постоянные электромагнитные аппараты, процессы в которых основаны на использовании явления электромагнитной индукции. К таким устройствам относится и реактор.

Электрическая энергия, как ресурс, имеет определенные характеристики, позволяющие судить об эффективности данного продукта в различных производственных процессах. Вместе такие характеристики, при которых потребитель электрической энергии способен выполнить заложенные в них функции, объединяются под общее понятие качества электрической энергии. В последние десятилетия улучшению качества электроэнергии уделяют большое внимание, потому что качество электрической энергии может ощутимо воздействовать на затраты электрической энергии, надежность систем электроснабжения, технологический процесс производства.

Если взять во внимание существенное увеличение стоимости строительства новых высоковольтных линий электропередачи, увеличивается спрос на электрические реакторы самого разного назначения и конструктивного исполнения.

Растут объемы потребления электроэнергии а соответственно и мощности сетей (до 500 МВАР). Соответственно растут мощности реакторов, их токи и напряжения, предъявляются новые требования к их характеристикам, находят применение новые материалы, схемы и конструкции отдельных узлов усложняются.

Возрастает потребность улучшения показателей пропускной способности текущих и будущих высоковольтных линий. Естественно экономически выгодным является, повысить передаваемую по линии

мощность до ограничений по нагреву с помощью использования различных аппаратов, в том числе реакторов.

Электрические реакторы, используемые в жизни намного более распространённые, нежели силовые статические преобразователи энергии. Если, в классификации реакторов по назначению насчитывается около 40 видов, то такая же классификация силовых трансформаторов насчитывает менее 10 видов.

Большинство из реакторов отличаются по составу номинальных данных и параметров. Например, для реакторов последовательного включения главными параметрами для проектирования являются номинальные ток и индуктивность или полное сопротивление, для шунтирующих реакторов – зарядная мощность линии и ее напряжение, для дугогасящих – номинальные напряжение и ток. Для насыщающегося задерживающего реактора необходимым является потокосцепление насыщения, для сглаживающегося нужны средняя или эквивалентная индуктивность и ток насыщения, в двоярных реакторах выбирают коэффициент связи.

Такое обилие требований к реакторам привело к использованию значительно большего разнообразия структур магнитопровода, чем в трансформаторах, нередко создают реакторы без стали. С точки зрения определяющих электромагнитных параметров, плавные вебер-амперные характеристики и показатели степени соотношений между параметрами. Основные виды структуры магнитопровода реакторов можно разбить на четыре группы: реакторы без стали, с разомкнутыми магнитными системами, с магнитными системами с зазорами и с замкнутыми магнитными системами. Так же все обычные силовые трансформаторы относятся к одной группе. По показателям степени законов подобия и оптимальным соотношениям они близки к реакторам с магнитными системами, имеющим зазоры.

Несмотря на обилие предъявляемых требований, и видов конструкций, большая часть электромагнитных расчетов реакторов имеет смежные методы расчета с трансформаторами. Расчеты магнитного поля в реакторах без стали

и с разомкнутой магнитной системой похожи на расчет поля рассеяния трансформаторов, хоть и в реакторах бывает важна роль кривизны обмоток и радиального поля. Расчеты реакторов с замкнутой магнитной системой похожи на расчет в трансформаторах при перевозбуждении или подмагничивании. Реактор, который имеет ненасыщенную магнитную систему с зазорами в стержне зачастую рассматривают как трансформатор, у которого первичной обмоткой является реальная обмотка реактора, а вторичным несуществующие фиктивные обмотки, которые окружают немагнитные зазоры и нагружены на индуктивность, соответствующую магнитной проводимости рассматриваемого немагнитного зазора. Поле же снаружи магнитопровода реактора считается как поле рассеяния реактора. Магнитное поле реактора не удастся точно раздробить, на основное и поле рассеивания, определение зависит от положения фиктивной обмотки и принятых допущений.

Иногда для использования расчетных методов, используемых для трансформаторов, бывает можно реактор без стали тоже рассматривать как трансформатор.

Отличительной частью реакторов, используемых в системах переменного тока, является относительно значительная роль добавочных потерь в обмотках, а также потери в элементах конструкции по сравнению с трансформаторами схожих по мощности или размерам, из-за того, что реактивная мощность магнитного поля в реакторе является номинальной мощностью реактора, а в трансформаторе лишь малая часть. Поэтому в реакторах раньше обнаружили опасные места нагрева крайних пакетов магнитопроводов, необходимость уменьшения осевого размера провода торцевых катушек обмоток, некоторые виды циркулирующих токов, недопустимые вибрации.

Несмотря на указанные частные отличия, можно сказать, что с точки зрения электромагнитного расчета, конструкции и технологии реактор – это однообмоточный трансформатор или наоборот.

Во всем мире большое распространение получили шунтирующие реакторы (ШР) и управляемые шунтирующие реакторы (УШР). Шунтирующие реакторы применяются в сетях высших классов напряжения для компенсации зарядной мощности линии. ШР и УШР отличаются обычно строением обмоток и их количество для ШР достаточно основной обмотки - сетевой обмотки в УШР используется еще управляющая обмотка (подмагничивающая) которая позволяет плавно регулировать индуктивность реактора, так же в 3-фазных реакторах может быть и компенсационная обмотка. ШР ставят обычно в сетях высокого напряжения для компенсации постоянной зарядной мощностью на линии. УШР ставят в сетях с переменной реактивной мощностью.

1 Состояние вопроса

1.1 Компенсация реактивной мощности

Компенсация реактивной мощности является очень актуальной темой на данный момент, так как со временем и развитием технологий увеличивается количество источников потребления у каждого человека или промышленного предприятия, что может привести к загрузенности линии. Менять линии электропередач и делать их с увеличенным сечением дорого и трудоёмко, поэтому выгоднее использовать компенсаторы реактивной мощности они дешевле, и их установка не займет много времени, правда, устанавливаются они не на электростанции, а либо между потребителем и источником на линии электропередач и подстанциях, либо непосредственно у потребителя. Примерное распределение нагрузки на сечение проводника электрической сети и при применении компенсаторов реактивной мощности изображены на рисунке 1 без компенсации, на рисунке 2 с компенсацией.

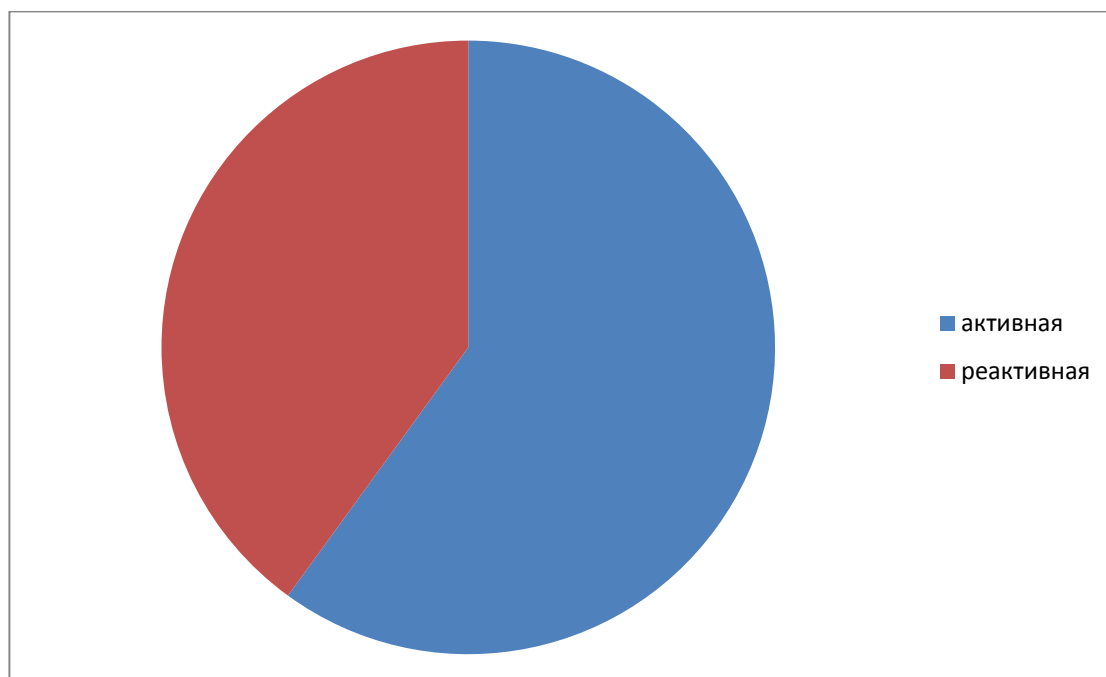


Рисунок 1.1 - процентная доля нагрузки сечения кабеля сети без компенсации реактивной мощности

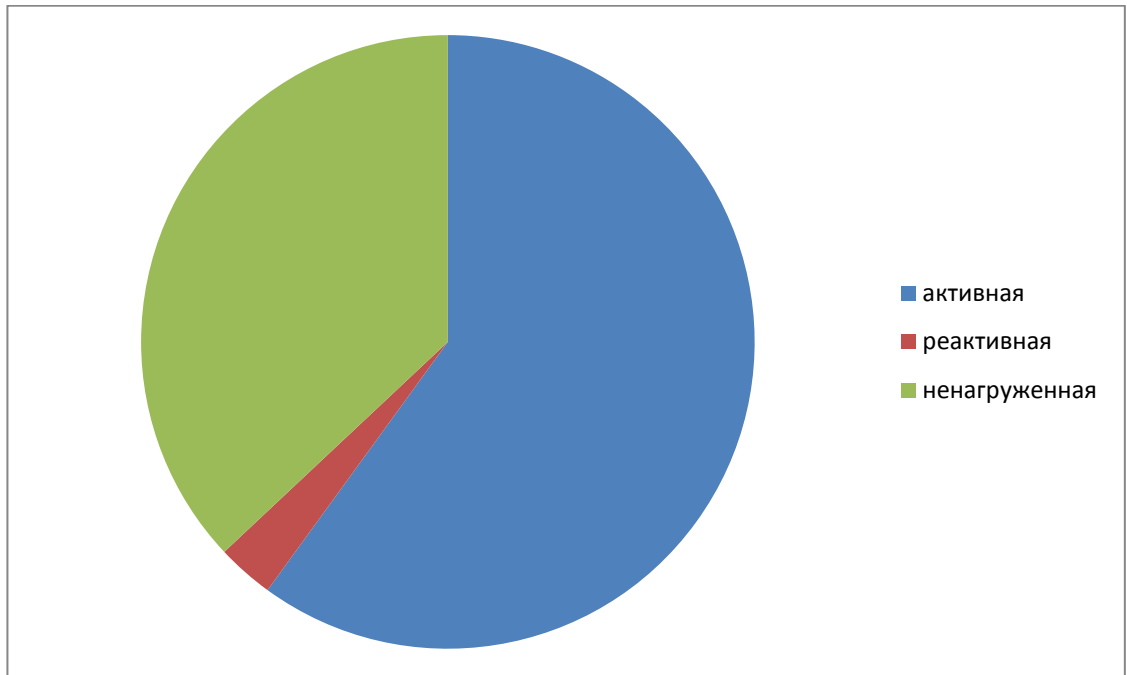


Рисунок 1.2 - процентная доля нагрузки сечения кабеля сети при компенсации реактивной мощности

Одними из первых компенсаторов энергии были конденсаторные батареи и синхронные компенсаторы.

Синхронные компенсаторы называются так, потому что основная составляющая данного компенсатора является синхронный электромеханический преобразователь энергии, работающий в режиме холостого хода с $\cos\varphi \approx 1$ и может работать в двух режимах:

- перевозбужденный режим с улучшенным $\cos\varphi$. Так как компенсатор работает в режимех.х., то ток идеального режима х.х. равен нулю, хотя это не соответствует действительности. Выполняется равенство $U_c = U_r = E$. Если изменить ток возбуждения (I_v) больше нуля $I_v \neq 0$, то в двигателе наводится ЭДС и следовательно $E > U$ - машина выходит из электрического равновесия и создается ток i , который будет отставать от $\Delta U, E, U$ на 90° . Соответственно в сеть будет отдаваться реактивная составляющая. На рисунке 1.3 приведена векторная диаграмма для данного случая;

- недовозбужденный режим. Если уменьшить I_B , в двигателе образуется ЭДС, соответственно $E < U$ - следствием i , который будет отставать от ΔU на 90° , но будет опережать E, U на 90° . Соответственно с сети будет забираться реактивная составляющая. На рисунке 1.4 приведена векторная диаграмма для данного случая.

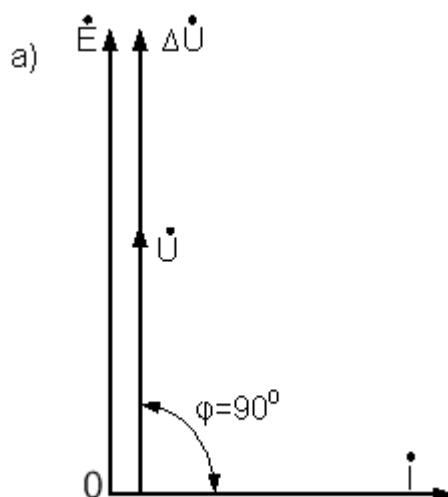


Рисунок 1.3-Векторная диаграмма работы синхронного компенсатора в перевозбужденном режиме.

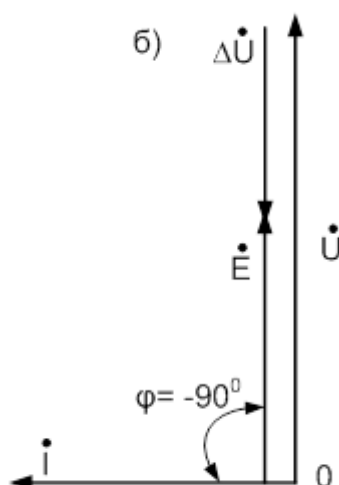


Рисунок 1.4 -Векторная диаграмма работы синхронного компенсатора в недовозбужденном режиме

Следует, что синхронный компенсатор работает в двух режимах: компенсации и потребления реактивной составляющей. Это значит, что он может не только отдавать, но и потреблять, что позволяет поддерживать баланс мощности в цепи. Он снабжается автоматической системой управления возбуждением и в автоматическом режиме регулирует $\cos\phi$ цепи. Также обладает большой инерционностью, что не позволяет ему быстро реагировать на изменение параметров цепи. При установке его в сеть с резко-переменной нагрузкой нужно максимально оптимизировать настройки регуляторов системы автоматического управления (САУ), чтоб машина не пошла в разнос, так как это может привести к аварийному отключению подстанции из-за бросков тока в сеть. Строятся на мощность до $S_n = 100\ 000$ кВА. Имеют явно полюсную конструкцию с $2p = 6$ или 8 — тихоходные. Подобные электромеханические преобразователи большой мощности делаются с водородным охлаждением.

Для асинхронного пуска снабжаются пусковыми обмотками в полюсных наконечниках или делают их с массивными полюсами. Пускаться они могут как прямым пуском, так и с помощью реакторов. Иногда используют гонный асинхронный двигатель для разгона машины до подсинхронной скорости.

Для возбуждения синхронного компенсатора чаще всего используют тиристорный преобразователь. Он прост в управлении, обладает малой инерционностью, дешев, по сравнению с другими устройствами, не требует постоянного обслуживания и быстро ремонтируем. Современные возбудители оборудованы микропроцессорной системой управления, которые могут в автоматическом режиме вычислять реактивную мощность и регулировать возбуждение машины, тем самым поддерживая баланс мощности.

Также ранее применялись, а кое-где и до сих пор используются, электромашинное возбуждение. Как правило, работает с очень малой чувствительностью и очень большой инерционностью по отношению к цепи. Дорог в обслуживании и эксплуатации. При выходе из строя долго находится в ремонте.

Даже если у такого компенсатора много преимуществ он является дорогостоящим как само устройство, так и в эксплуатации занимает много места вызывает шум и вибрации. Они используются и в наше время, но относительно других компенсаторов считается устаревшим.

Емкостные батареи являются еще одним решением компенсации реактивной мощности. Они предназначены для выдачи реактивной мощности в систему. Снижение перетоков реактивной мощности от генератора к нагрузке в сети приводит к снижению потерь активной энергии, снижению потерь напряжения. Но такие системы компенсируют только индуктивную нагрузку. Такие установки ставятся в основном на производстве или у потребителя и являются эффективными.

Применение конденсаторных батарей позволяет:

- снизить общие расходы на электроэнергию;
- уменьшить нагрузку подводящих линий, трансформаторов и распределительных устройств;
- снизить тепловые потери тока и расходы на электроэнергию;
- снизить влияние высших гармоник;
- подавить сетевые помехи, снизить несимметрию фаз;
- добиться большей надежности и экономичности распределительных сетей.

А также в существующих сетях:

- исключить генерацию реактивной энергии в сеть в часы минимальной нагрузки;
- уменьшить расходы на ремонт и обновление парка электрооборудования;
- увеличить пропускную способность системы электроснабжения потребителя, что позволит подключить дополнительные нагрузки без увеличения стоимости сетей;
- обеспечить получение информации о параметрах и состоянии сети.

Так же после появления разных полупроводниковых элементов появились фильтрокомпенсирующие устройства и статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности, которые ставятся непосредственно у потребителя так полупроводниковые элементы не предназначены для очень высоких напряжений и токов высоковольтных линии. Фильтрокомпенсирующие устройство(ФКУ) и статический тиристорный компенсатор(СТК) в своем составе имеют конденсаторные батареи или реакторы, либо все, вместе создавая управляемые маломощные компенсаторы электрической энергии.

Реакторы предположительно появились в 20 годах прошлого века, но им не находили применения и не исследовали их использовали обычно только в частных случаях или лабораторных установках. Так было примерно вплоть до 50-х годов прошлого века тогда начали производиться первые испытания и изучения реакторов. Например, управляемый реактор с вращающимся магнитным полем применяющийся в системах управления в качестве магнитного усилителя, хотя у подобных реакторов было много назначений, например, регулирующий элемент статического компенсатора реактивной мощности, управляемая поперечная компенсация для передачи переменного тока, ограничитель тока короткого замыкания все благодаря малым потерям реакторов. Отчасти такой реактор был похож на асинхронную машину переменного тока. В таких аппаратах индуктивное сопротивление регулируется плавно путем подмагничивания постоянным током, в принципе этот метод используется в большинстве регулируемых современных реакторов. Однако недостатком таких реакторов является по сравнению с современными САУ является малая глубина регулирования и время регулирования, а относительно компенсирующих потери появляются на системе управления.

Также были созданы так называемые сухие реакторы, работающие на реактивной мощности сети и представляющие из себя однообмоточный

преобразователь энергии без магнитопровода устанавливаемые на подстанциях для компенсации реактивной мощности.

С развитием технологий и потребностей появились управляемые шунтирующие реакторы. Такие реакторы используются в основном в системах с автоматическим управлением в которых также присутствуют конденсаторные батареи и управляются с помощью тиристорных или транзисторных схем управления служат для соединения разных энергосетей в общую, удалению помех и синхронизации этих сетей, например, взять каскад сибирских гидроэлектростанций(ГЭС) и европейскую часть России у них разные нагрузка и производство электроэнергии при объединении в единую энергосистему просто включение может привести к нежелательным последствиям, поэтому ставят подобные автоматические системы, а точнее обычно ставят целые специальные подстанции, которые включают в себя подобные системы с УШР.

УШР трансформаторного типа создавались в Санкт-Петербургском политехническом университете. Управляемый шунтирующий трансформаторного типа реактор(УШТР) представляет собой силовой электромагнитный преобразователь энергии с напряжением к.з. 100%, на вторичной обмотке которого установлены встречно-паралельные тиристорные ключи на полную мощность реактора. Аналогично схеме СТК полностью открытые тиристоры закорачивают вторичную обмотку и обеспечивают максимальную потребляемую мощность УШТР, при закрытых тиристорах его мощность равна х.х. преобразователя, а в промежуточных режимах потребляемая мощность плавно регулируется изменением угла управления вентилей с соответствующим появлением высших гармоник в потребляемом токе. Для снижения уровня этих гармоник со стороны низшего напряжения устанавливаются фильтры.

Таким образом, схема УШТР сводится к схеме СТК, в электромагнитной части которого совмещены индуктивности фаз с трансформатором связи с высшим напряжением. Это позволяет, в отличие от СТК, подключать УШТР к

любому классу напряжения, однако тиристорные ключи большой мощности определяют очень дороги что значит высокую стоимость конструкции, монтажа и эксплуатации, в особенности для условий Сибири и Крайнего севера. Поэтому опыт применения их в России ограничен двумя реакторами напряжением 110 кВ, введенным в эксплуатацию менее четырех лет назад. Кроме того, проектирование релейной защиты таких устройств может быть сведено к известным способам защиты силовых трансформаторов (с учетом повышенного напряжения к.з.) и тиристорных преобразователей (вентилей СТК).

Значительным прорывом при создании УШР и УШТР произвела канадская ВВС, создав в конце 20 века управляемого реактора трансформаторного типа, на 750 кВ, общей мощностью 450МВАР. Каждая фаза реактора содержит замкнутый магнитопровод с зазорами в стержне и три обмотки: сетевую (наружную), постоянно подключенную к сети высшего напряжения, обмотку управления (внутреннюю), замкнутую тиристорным блоком, и компенсационную обмотку, предназначенную для компенсации третьей гармоники в токе реактора. С этой целью компенсационные обмотки трех фаз соединены в треугольник.

К сожалению, реактор был создан без должной теоретической подготовки. Его конструкция повторяла обычную конструкцию трансформаторов без каких-либо принципиальных изменений. Это привело к повышенным потерям в реакторе, примерно в 5 раз превышающим потери в обмотках (2% от номинальной мощности в номинальном режиме работы). Не приняты были меры и для подавления высших гармонических колебаний тока в реакторе, вызываемые работой тиристорных. В результате содержание высших гармонических в токе реактора составило 6% от номинального тока. Последний недостаток удалось преодолеть установкой фильтров на стороне высокого напряжения, что существенно снижает надежность работы реактора и осложняет его эксплуатацию (потому что конденсаторы фильтров

периодически повреждаются). Принципиальная схема реактора ВВС представлена на рисунке 1.5.

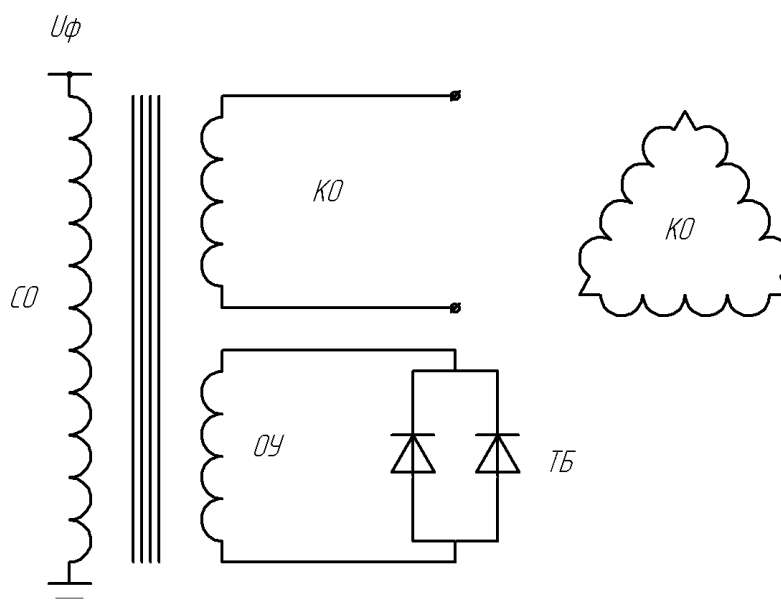


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема УШР компании ВВС

1.2 Создание преобразователей энергии

Начало развития преобразователей энергии на основе электромагнитной индукции также было обусловлено промышленным прогрессом еще в 1870 годах прошлого века требовалось предавать огромное количество энергии определенных характеристик на большие расстояния, почти вся аппаратура была под высоким напряжением, что неизбежно приводило к авариям.

Первым устройством, являющиеся прародителем трансформатора, был преобразователь энергии, основанный на электромагнитной индукции, с последовательным включением и не замкнутым магнитопроводом одного русского конструктора, который он использовал для питания электрических свечей. Позже, трансформаторы с замкнутой магнитной системой, подобным, применяемым в настоящее время, появились в 19 веке, в Англии. Однако начало широкого практического применения однофазных трансформаторов с замкнутым сердечником связывают с венгерской фирмой, которая позже в 19

веке ввели впервые термин «трансформатор» и указали на возможность выполнения «кольцевых» и «броневых» конструкций. Впервые предложили параллельное включение электромагнитных преобразователей энергии. О быстром развитии осветительных установок однофазного переменного тока можно судить по тому что за 1 год после патентования только одна фирма выполнила 24 такие установки на общую мощность 3 МВт. Рисунки электромагнитных преобразователей энергии венгерской компании представлены на рисунке 1.6 и 1.7.

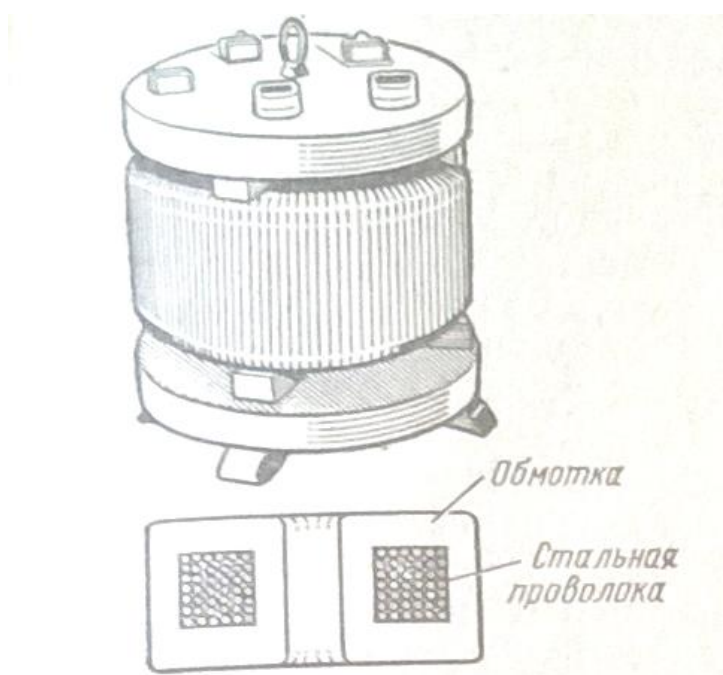


Рисунок 1.5 –электромагнитный преобразователь венгерской фирмы с кольцевой магнитной системой

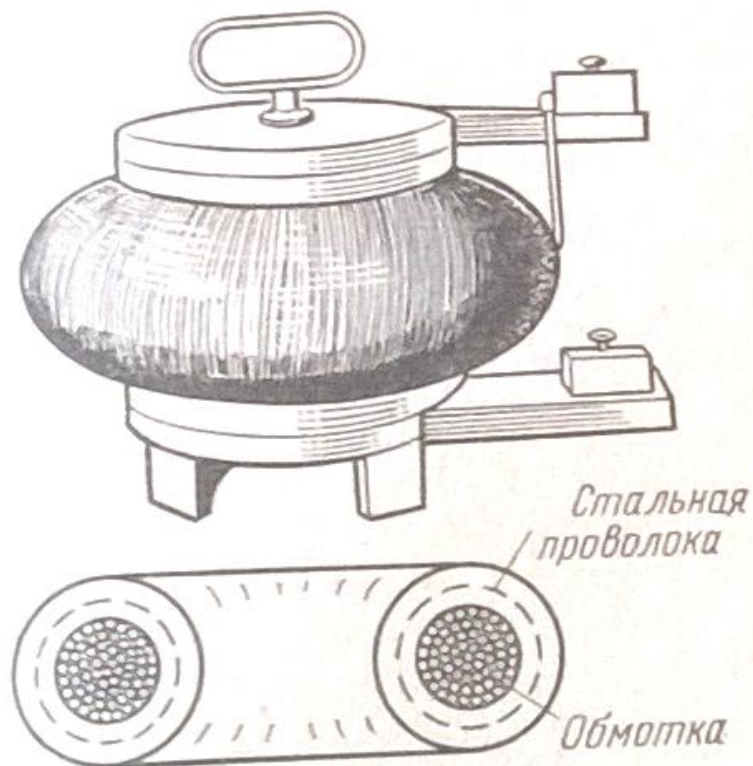


Рисунок 1.6 – электромагнитный преобразователь венгерской фирмы с броневой магнитной системой

Однако проблема использования переменного тока для электрического привода все еще не была решена.

Шунтирующий реактор рассматриваемы в данной работе является современным решением актуальных проблем, то есть компенсации реактивной мощности, в случае с этим реактором для компенсации зарядной мощности высоковольтных линий.

Целью данной работы является разработка неуправляемого шунтирующего реактора для компенсации зарядной мощности на линии и увеличения пропускной способности.

На основе поставленной цели дипломного проектирования, следует решить следующие задачи:

1. получить потери в режимах холостого хода и короткого замыкания меньше чем поставлены в исходных данных.

2. Увеличить прочность изоляции пуска 2 транспонированных провода в одном витке располагая их плоской стороной друг к другу.

2 Расчет параметров реактора

2.1 Основы выбора реактора

Для начала рассмотрим принцип работы реактора основанных на работе электрических цепей, содержащих активную, емкостную и индуктивную нагрузку в этом случае на создание электрического и магнитного поля будет расходоваться энергия, равная энергии этих полей

$$W_{\text{мэ. ср.}} = \frac{LI^2}{2} (1 - \cos 2\omega t) + \frac{I^2}{2\omega^2 C} (1 + \cos 2\omega t) \text{ Дж} \quad (2.1)$$

Где можно выделить постоянную и переменную составляющую электрического и магнитного поля.

Постоянная составляющая численно равна энергии тратимой при переходном процессе цепи.

$$W_{\text{мэ. пост}} = \frac{LI^2}{2} + \frac{I^2}{2\omega^2 C} \text{ Дж} \quad (2.2)$$

Переменная составляющая электрического и магнитного поля изменяемая с двойной угловой скоростью.

$$W_{\text{мэ. пер}} = \frac{LI^2}{2} - \frac{I^2}{2\omega^2 C} \cos 2\omega t \text{ Дж} \quad (2.3)$$

Реактивная мощность, установившегося процесса, Q пропорциональна среднему за $\frac{1}{4}T$ (четверть периода) энергии отдаваемой источником на поддержание электрического и магнитного поля.

$$Q = \frac{\pi \omega \cdot W_{\text{мэ. пер. сред}}}{2} \text{ Вт} \quad (2.4)$$

Исходя из этих формул следует, если

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{I^2}{2\omega^2 C} \quad (2.5)$$

То $Q=0$, то есть надо подобрать параметры индуктивности и емкости чтобы эти выражения были равны.

При выборе реактора обычно есть высоковольтная линия, имеющая зарядную емкость и надо подобрать реактор определенной индуктивности чтобы реактивная мощность стала равна 0.

Правда в техническом требовании редко указывается зарядная мощность линии. Обычно указывают реактивную мощность, из которой и высчитывается необходимая индуктивность, а из нее и основные параметры реактора.

2.2 Расчет параметров реактора

2.2.1 Расчет индуктивности реактора

Найдем комплексное сопротивление из исходных параметров

$$Z = \frac{\left(\frac{U}{3}\right)^2}{Q} = \frac{\left(\frac{525000}{3}\right)^2}{60000000} = 1531 \text{ Ом} \quad (2.6)$$

Из комплексного сопротивления найдем индуктивность

$$L = \frac{Z}{2\pi f} = \frac{1531}{2 * 3.14 * 50} = 4.9 \text{ Гн} \quad (2.7)$$

2.2.2 Расчет основных размеров реактора

Основная формула для расчета индуктивности реактора

$$L = \mu_0 w^2 \left(\frac{S_3}{I_{3, \text{сум}}} + \frac{S_a - S_{\text{ст}} - 0.75 \Pi_{\text{ст}} * \varepsilon}{\frac{3}{H_{\text{обм}}}} \right) \text{ Гн} \quad (2.8)$$

Где, μ_0 – магнитная постоянная;

w – число витков;

S_3 – площадь зазора;

$I_{3, \text{сум}}$ – высота зазоров суммарная;

$\frac{S_a}{3}$ – площадь одной третьей части радиального размера обмотки;

$S_{\text{ст}}$ – площадь сечения стержня;

$\Pi_{\text{ст}}$ – периметр сечения стержня;

ε – выпуклость магнитного поля в зазоре;

$H_{\text{обм}}$ – высота обмотки.

Так как большинство параметров зависит от диаметра стержня мы зададимся им исходя из наиболее эффективных размеров чтобы не было перерасхода стали либо перерасхода провода.

Отсюда возьмем диаметр стержня 730 мм. Диаметр отверстия в середине 100мм.

Стержень возьмем радиально шихтованный с соединением в середине для правильного распределения потоков мощности в зазорах и магнитопроводе которые могут значительно влиять на местные нагревы в стержне. Так же можно в реакторах использовать и эвольвентную схему шихтовки

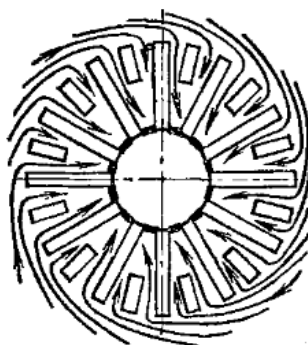


Рисунок 2.1- Картина потоков мощности в зазоре стержневого реактора при радиальном виде шихтовки и центральной схеме заземления.

Сталь магнитопровода возьмем 3409.30 с рекомендуемой индукцией 1.72.

Так как это однофазный неуправляемый реактор мы выбираем стержень типа ½ с ярмами в половину сечения и одной сетевой обмоткой(СО) на основном стержне.

Посчитаем вольт-виток исходя из стержня

$$\begin{aligned}
 U_{в.в} &= 4,44 * f * B_{ст} * k_{зап} \pi * \frac{D_{ст}^2}{2} - \pi * \frac{D_{в.отв.}^2}{2} = \\
 &= 4,44 * 50 * 1,72 * 0,979 \pi * \frac{0,73^2}{2} - \pi * \frac{0,1^2}{2} = 153,5 \text{ В/в} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

$k_{зап}$ – коэффициент заполнения стержня принимается равным 0.979;

$D_{в.отв.}$ – диаметр внутреннего отверстия.

Найдем количество витков.

$$W = \frac{U_{\phi}}{U_{в0}} = \frac{303,108}{153,5} = 1976 \text{ ВИТКОВ} \quad (2.10)$$

Теперь надо определиться с размерами обмотки.

Примем количество прокладок(полей) равным 48.

Надо подобрать катушки так чтобы дробное количество витков было больше 0.5.

Выбираем обмотку с непрерывные катушки с вводом в середину RL, 142 катушки в каждой $27\frac{40}{48}$ витков на две зоны с учетом того что у нас 2 параллельные ветви.

Теперь выберем провод, для медного провода эффективная плотность тока находится в диапазоне $2\div 3$ А/мм².

Найдем ток реактора

$$I = \frac{\frac{3Q}{U}}{3} = \frac{3 \cdot 60000}{\frac{525}{3}} = 199.95 \text{ А} \quad (2.11)$$

Мы берем три мощности так как у нас идет трехфазная система линии электропередач. Так как у нас ввод в середину обмотка делится на две зоны и ток делится на два. Следовательно, в каждой зоне ток будет примерно равен 100 А.

Следовательно, эффективное сечение витка будет в пределах $50\div 33$ А/мм².

Возьмем транспонированный провод ПТБ $\frac{1 \cdot 5}{2} * 5$, что означает в проводе 5 элементарных проводников с радиальным размером 1 мм и 5 мм осевым, изоляция провода 2мм на две стороны, толщина склейки в проводе стандартно 0.1 мм. Возьмем 2 провода в радиальном направлении в 1 витке. Транспонированный провод изготавливается из более прочных проводов и обладает большей динамической устойчивостью по сравнению с обычным проводом. Сечения витка составит 50 мм² плотность тока 2 А/мм².

Теперь можем посчитать размеры обмотки

$$\begin{aligned} l_{\text{рад}} &= l_{\text{изол}} + l_{\text{склейк}} * n_{\text{склейк}} + l_{\text{рад.пров}} * n_{\text{пров}} * n_{\text{пров.в.рад.}} * n_{\text{ц.в}} = \\ &= 2 + 0.1 * 2 + 1 * 3 * 2 * 28 = 291,2 \text{ мм} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Высоту радиальных охлаждающих каналов между катушками примем 4.8 мм.

Усадку изоляции принимаем 10% в осевом направлении.

$$H_{\text{обм}} = h_{\text{изл}} * 0.9 + h_{\text{склейк}} * 0.9 + h_{\text{пров}} * n_{\text{пров}} * n_{\text{кат}} + h_{\text{кан}} * n_{\text{кан}} =$$

$$= 2 * 0.9 + 0.1 * 0.9 + 5 * 2 * 142 + 4.8 * 141 = 2365,2 \text{ мм} \quad (2.13)$$

Теперь надо задаться параметрами главной изоляции.

Есть стандартизованные параметры напряженности в трансформаторном масле:

Между ярмом и обмоткой 8 кВ/мм;

Между обмоткой и стержнем или экраном стержня 4 кВ/мм.

Посчитаем сначала изоляцию между ярмом и обмоткой

$$h_{\text{ярм.изл}} = \frac{U}{E} = \frac{525}{8} = 70 \text{ мм} \quad (2.14)$$

Изоляция между обмоткой и стержнем

$$h_{\text{ст.изл}} = \frac{U}{E} = \frac{525}{4} = 132 \text{ мм} \quad (2.15)$$

Так же на боковых ярмах и стержне установим электростатические экраны на расстоянии 20 мм от них и толщиной в 3 мм.

Изоляция от обмотки до бака составит 150 мм, от бокового ярма до бака 100 мм.

Найдем размеры магнитопровода.

Высота стержня, равная высоте окна

$$H_{\text{ст}} = H_{\text{обм}} + 2 * h_{\text{ярм.изл}} = 2365,2 + 2 * 70 = 2505,2 \text{ мм} \quad (2.16)$$

Ширина окна

$$B_{\text{окн}} = h_{\text{ст.изл}} + l_{\text{рад}} + h_{\text{ярм.изл}} + 2 * l_{\text{эк}} + l_{\text{кан.эк.ст}} =$$

$$= 132 + 291,2 + 70 + 2 * 3 + 20 = 539,2 \text{ мм} \quad (2.17)$$

Теперь вернемся к формуле 2.8

$$L = \mu_0 W^2 \frac{S_3}{l_{3.\text{сум}}} + \frac{S_a - S_{\text{ст}} - 0.75 \Pi_{\text{ст}} * \varepsilon}{H_{\text{обм}}} =$$

$$= 4 * 3,14 * 10^{-7} * 1976^2 \left(\frac{S_3}{l_{3.\text{сум}}} + \right.$$

$$+ \frac{\frac{291,2}{3} * 3,14 * 730 + 2 * 20 + 3 + 132 + 291,2}{2365,2} - \frac{417 - 0,75 * 3,14 * 730 * \varepsilon}{2365,2} \Gamma_{\text{H}} \quad (2.18)$$

После многочисленных преобразований мы видим остались еще не определенные параметры.

Которые мы выбираем из равенства указанного выше:

$$H_3 = 34 \text{ мм};$$

$$H_B = 96 \text{ мм};$$

$$n_3 = 19 ;$$

$$n_B = n_3 - 1 = 18.$$

Стержень также содержит не стандартные вставки вверху и внизу а также распределительные шунты по 105 мм.

Найдем выпуклость магнитного поля в зазоре

$$\varepsilon = H_3 * \frac{1}{\pi} * \ln\left(1 + \frac{H_3}{H_B}\right) = 0,034 * \frac{1}{3,14} * \ln\left(1 + \frac{0,034}{0,096}\right) = 0,003 \text{ м} \quad (2.19)$$

Площадь зазора

$$S_3 = S_{\text{СТ}} + 4 * D_{\text{СТ}} * \varepsilon = 0,417 + 4 * 0,73 * 0,003 = 0,426 \text{ мм} \quad (2.20)$$

Площадь стержня

$$S_{\text{СТ}} = k_{\text{зап}} \pi * \frac{D_{\text{СТ}}^2}{2} - \pi * \frac{D_{\text{В.ОТВ.}}^2}{2} = 0,979 \pi * \frac{0,73^2}{2} - \pi * \frac{0,1^2}{2} = 0,417 \text{ мм} \quad (2.21)$$

Уточним индукцию стержня с зазорами

$$B = \frac{B_{\text{СТ}}}{\frac{1}{0,979} + \frac{2 * \varepsilon * \pi * D_{\text{СТ}}}{S_{\text{СТ}}}} = \frac{1,72}{\frac{1}{0,979} + \frac{2 * 0,00115 * 3,14 * 0,73}{0,417}} = 1,657 \text{ Тл} \quad (2.22)$$

Индукция в ярме соответственно равна $B_{\text{ярм}} = 1,6 \text{ Тл}$.

2.2.3 Параметры режима короткого замыкания

Напряжение короткого замыкания найдем через индуктивное сопротивление которое находилось в 2.2.1

$$U_{\text{к}} = \frac{Z * Q}{U_{\phi}^2} = \frac{1540 * 60000000}{303108^2} = 1,005 \% \quad (2.23)$$

Определим длину провода

$$l_{\Pi} = \pi * D_{\text{ср.об}} * w = 3,14 * 1,3312 * 1976 * 2 = 16520 \text{ м} \quad (2.24)$$

где, $D_{\text{ср.об}} = D_{\text{ст}} + 2h_{\text{ст.изл}} + l_{\text{рад}} = 1,3312 \text{ м}$.

Найдем сопротивление обмотки при установившейся температуре

$$R_{\text{обм}} = \rho * \frac{l_{\Pi}}{F_{\text{в}}} = 2,13 * 10^{-8} * \frac{16520}{0,00005} = 7 \text{ Ом} \quad (2.25)$$

где, $F_{\text{в}}$ - сечения витка.

Определим потери в проводе

$$P_{\Pi} = I^2 * R_{\text{обм}} = 100^2 * 7 = 70000 \text{ Вт} \quad (2.26)$$

Найдем дополнительные потери.

Индукция поля рассеянья в осевом направлении

$$B_{\text{ос}} = \frac{\sqrt{2} * \mu_0 * I * w * K_{\text{ос}}}{H_{\text{обм}}} = \frac{\sqrt{2} * 4 * 3,14 * 10^{-7} * 100 * 1976 * 0,95}{2,3652} = 0,141 \text{ Тл} \quad (2.27)$$

где, $K_{\text{ос}} = 0,95$ – коэффициент поправки индукции осевого поля.

Потери на единицу массы в обмотке СО от осевых полей

$$P_{\text{в.ос}} = \frac{\pi^2 * f^2 * b_{\text{нр}}^2}{18 * \gamma_{\text{нр}} * \rho_{\text{нр}}} * B_{\text{ос}}^2 = \frac{3,14^2 * 50^2 * 0,00135^2}{18 * 8900 * 2,135 * 10^{-8}} * 0,141^2 = 0,261 \text{ Вт/кг} \quad (2.28)$$

Найдем массу провода

$$G_{\Pi} = l_{\Pi} * \gamma_{\Pi} = 16520 * 0,0005 * 8900 = 7351,4 \text{ кг} \quad (2.29)$$

Потери от осевых полей в обмотке СО

$$P_{\text{в.ос}} = p_{\text{в.ос}} * G_{\Pi} = 0,261 * 7351,4 = 1919 \text{ Вт} \quad (2.30)$$

Теперь найдем потери от радиального поля рассеянья

$$B_{\text{рад1}} = 0,4 * B_{\text{ос}} = 0,4 * 0,141 = 0,0564 \text{ Тл} \quad (2.31)$$

$$B_{\text{рад2}} = 0,1 * B_{\text{ос}} = 0,1 * 0,141 = 0,0141 \text{ Тл} \quad (2.32)$$

$$B_{\text{рад1-2}} = \sqrt{B_{\text{рад1}}^2 + B_{\text{рад1}} * B_{\text{рад2}} + B_{\text{рад2}}^2} = \sqrt{0,0564^2 + 0,0564 * 0,0141 + 0,0141^2} = 0,064 \text{ Тл} \quad (2.33)$$

$$B_{\text{рад2-3}} = B_{\text{рад2}} \quad (2.34)$$

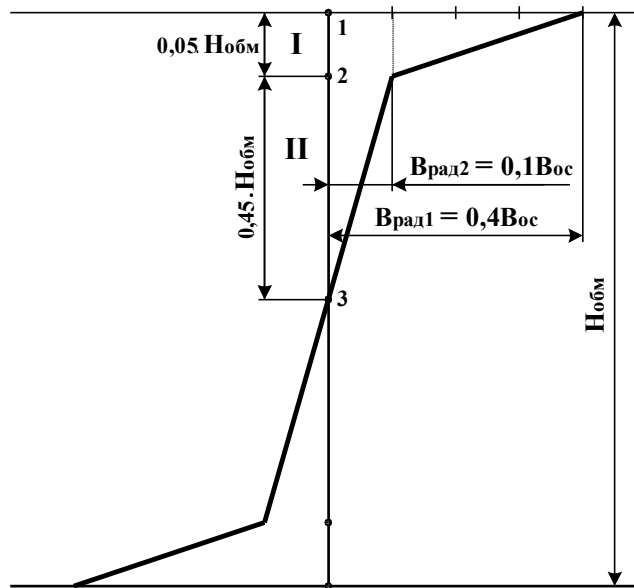


Рисунок 2.2 - Распределение индукции радиального поля вдоль высоты обмотки

потери от радиального поля рассеяния в обмотке СО на единицу массы провода

$$P_{в.рад.1-2} = \frac{\pi^2 * f^2 * h_{np}^2}{18 * \gamma_{np} * \rho_{np}} * B_{рад1-2}^2 = \frac{3,14^2 * 50^2 * 0,01^2}{18 * 8900 * 2,13 * 10^{-8}} * 0,064^2 = 0,03 \text{ Вт/кг} \quad (2.35)$$

$$P_{в.рад.2-3} = \frac{\pi^2 * f^2 * h_{np}^2}{18 * \gamma_{np} * \rho_{np}} * B_{рад2-3}^2 = \frac{3,14^2 * 50^2 * 0,01^2}{18 * 8900 * 2,13 * 10^{-8}} * 0,141^2 = 0,01 \text{ Вт/кг} \quad (2.36)$$

Полные потери на участках 1-2 и 2-3 от радиальной составляющей поля рассеяния в обмотке СО

$$P_{в.рад.1-2} = p_{в.рад.1-2} * G_{пр.1-2} = 0,03 * 0,05 * 7351,4 = 11 \text{ Вт} \quad (2.37)$$

$$P_{в.рад.2-3} = p_{в.рад.2-3} * G_{пр.2-3} = 0,01 * 0,45 * 7351,4 = 33 \text{ Вт} \quad (2.38)$$

где, $G_{пр.1-2} = 0,05 * G_{пр}$; $G_{пр.2-3} = 0,45 * G_{пр}$.

Потери от радиальной составляющей поля рассеяния в обмотке СО

$$P_{в.рад} = 2 * (P_{в.рад.1-2} + P_{в.рад.2-3}) = 2 * (11 + 33) = 88 \text{ Вт} \quad (2.39)$$

Расчет добавочных потерь от циркулирующих токов, вызванных осевым полем рассеяния не производится так как у нас транспозиция считается идеальной и потерь нет.

Расчет потерь в металлоконструкциях

Они вызываются полями рассеяния и выделяются в элементах конструкции реактора – стенках бака, ярмовых балках, прессующих кольцах и др. Расчет этих потерь достаточно сложен, но, поскольку они составляют сравнительно небольшую часть потерь короткого замыкания, могут быть определены приближенными методами.

Для расчета добавочных потерь в металлоконструкциях необходимо определить размеры бака (предварительно). Окончательные размеры бака определяются в результате выполнения компоновки активной части трансформатора в баке.

Ширина бака

$$\begin{aligned} B_6 &= D_{ст} + 2 * l_{эк} + l_{с.э} + 2 * h_{ст.из} + 2 * l_{рад} + 2 * l_{об.б} \\ &= 0,73 + 2 * 0,003 + 0,02 + 2 * 0,132 + 2 * 0,2912 + 2 * 0,15 = \\ &= 1,9224 \text{ м} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Длина бака

$$\begin{aligned} L_6 &= 3 * D_{ст} + 4 * h_{ст.из} + l_{эк} + l_{с.э} + 2 * l_{рад} + 2 * l_{яр.б} = \\ &= 3 * 0,73 + 4 * 0,132 + 0,02 + 0,003 + 2 * 0,2912 + 2 * 0,1 = \\ &= 3,6 \text{ м} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Периметр бака

$$P_6 = 2 * L_6 + B_6 = 2 * 1,9224 + 3,6 = 11 \text{ м} \quad (2.42)$$

Средний радиус бака

$$R_6 = \frac{L_6}{2} = \frac{1,9224}{2} = 0,9612 \text{ м} \quad (2.43)$$

Добавочные потери в металлоконструкциях.

Добавочные потери в металлоконструкциях приближенно могут быть рассчитаны по формуле

$$\begin{aligned} P_{доб.конст} &\approx \frac{\kappa \cdot U_{кз.р}^2 \% \cdot \Phi_{ст}^2 \cdot H_{обм}^3 \cdot 10^4}{\Pi_B \left[H_{обм} + 2 \cdot \left(R_B - \frac{D_{н-в}}{2} \right) \right]^2} = \\ &= \frac{2,2 * 1,005^2 * 0,69^2 * 2,3652^3 * 10^4}{11 * (2,3652 + 2 * 0,9612 * 0,85)} = 3182 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (2.44)$$

где, $k = 2,20$ при $U_{кз.р} \leq 11,5 \%$,

$$\Phi_{СТ} = S_{СТ} \cdot B = 0,417 \cdot 1,657 = 0,69 - \text{поток одного стержня, Вб.}$$

Полные потери к.з.

$$\begin{aligned} P_{к.з.} &= P_{\Pi} + P_{в.ос} + P_{в.рад} + P_{доб.конст} = \\ &= 70000 + 1919 + 88 + 3182 = 75169 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (2.45)$$

2.2.4 Параметры холостого хода (х.х.)

Масса стержня

$$\begin{aligned} G_{СТ} &= S_{СТ} \cdot H_{СТ} - 2 \cdot 105 - n_3 \cdot H_3 \cdot y_c = \\ &= 0,417 \cdot 2,5052 - 2 \cdot 0,105 - 19 \cdot 0,034 \cdot 7650 = 5261 \text{ кг} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Масса ярма

$$\begin{aligned} G_{ярм} &= 4 \cdot \frac{S_{СТ}}{2} \cdot B_{окн} + 2 \cdot \frac{S_{СТ}}{2} \cdot H_{СТ} \cdot y_c = \\ &= 4 \cdot 0,21 \cdot 0,5392 + 2 \cdot 0,21 \cdot 2,5052 \cdot 7650 = 11515 \text{ кг} \end{aligned} \quad (2.47)$$

Масса углов

$$\begin{aligned} G_{угл} &= \frac{S_{СТ}}{2} \cdot \frac{D_{СТ}}{2} \cdot 0,98 \cdot 8 \cdot y_c = 0,21 \cdot 0,365 \cdot 0,98 \cdot 8 \cdot 7650 = \\ &= 4598 \text{ кг} \end{aligned} \quad (2.48)$$

Масса магнитопровода

$$G_{м} = G_{угл} + G_{ярм} + G_{СТ} = 5261 + 11515 + 4598 = 21374 \text{ кг} \quad (2.49)$$

Исходя из индукции стержня определяем удельные потери во всех участках магнитопровода:

$p_{СТ} = 1,2$ Вт/кг – удельные потери в стали;

$p_{ярм} = 1$ Вт/кг – удельные потери в стали;

$p_{угл} = 1,1$ Вт/кг – удельные потери в стали.

Потери холостого хода

$$\begin{aligned} P_{х.х.} &= p_{СТ} \cdot G_{СТ} + p_{ярм} \cdot G_{ярм} + p_{угл} \cdot G_{угл} = \\ &= 1,2 \cdot 5261 + 11515 + 1,1 \cdot 4598 = 22886 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (2.50)$$

Из индукции стержня находим удельную намагничивающую мощность:

$q_{СТ} = 1,5$ кВАР/кг;

$q_{ярм} = 1,2$ кВАР/кг;

$q_{\text{угл}}=1,3$ кВАР/кг.

Найдем намагничивающую мощность холостого хода

$$\begin{aligned} Q_{\text{х.х}} &= q_{\text{ст}} * G_{\text{ст}} + q_{\text{ярм}} * G_{\text{ярм}} + q_{\text{угл}} * G_{\text{угл}} = \\ &= 1,5 * 5261 + 1,2 * 11515 + 1,3 * 4598 = 27686,9 \text{ кВАР} \end{aligned} \quad (2.51)$$

Найдем активную и реактивную составляющие тока холостого хода

$$i_{\text{х.х.р}} = \frac{Q_{\text{х.х}}}{10S} = \frac{27686900}{10*60000000} = 0,05 \% \quad (2.52)$$

$$i_{\text{х.х.а}} = \frac{P_{\text{х.х}}}{10S} = \frac{22886}{10*60000000} = 0,00004 \% \quad (2.53)$$

Найдем ток холостого хода

$$i_{\text{х.х}} = \sqrt{0,05^2 + 0,00004^2} = 0,05 \% \quad (2.54)$$

2.2.5 Тепловой расчет

Задача теплового расчета состоит в определении превышении температуры обмоток и верхних слоев масла над температурой окружающей среды и выборе системы охлаждения, обеспечивающей значения этих превышении не выше нормализованных: $[Q_{\text{обм}}] = 65^\circ\text{C}$ и $[Q_{\text{в.сл.м}}] = 60^\circ\text{C}$.

Превышение температуры катушки над охлаждающим воздухом складывается из двух составляющих, рассчитываемых отдельно

$$Q_{\text{кат}} = Q_{\text{кат.мс}} + Q_{\text{мс.ср}} \quad (2.55)$$

где, $Q_{\text{кат.мс}}$ – превышение температуры катушки обмотки над омываемым маслом;

$Q_{\text{мс.ср}}$ – среднее превышение температуры масла над охлаждающим воздухом.

Удельная тепловая нагрузка теплоотдающей поверхности катушки может быть рассчитана по формуле

$$q_{\text{кат}} = \frac{\rho_{\text{пр}} \cdot j \cdot I_{\text{обм}} \cdot W_{\text{кат}} \cdot K_{\text{закр.кат}} \cdot (1 + K_{\text{доб.кат}})}{2 \cdot m_{\text{в}} \cdot (b_{\text{кат}} + h_{\text{кат}})} \quad (2.56)$$

где, $K_{\text{закр.кат}}$ – коэффициент закрытия части поверхности катушки изоляционными прокладками, создающими канал между катушками.

$$K_{закр.кат} = \frac{\pi \cdot D_{обм.ср}}{\pi \cdot D_{обм.ср} - n_{прокл} \cdot b_{прокл}} = \frac{3,14 \cdot 1,3312}{3,14 \cdot 1,3312 - 48 \cdot 0,06} = 3,21 \quad (2.57)$$

здесь $b_{прокл} = 0,06$ м.

$K_{добр.кат}$ – коэффициент учитывающий действие добавочных потерь, равный отношению суммы добавочных потерь в обмотке к основным потерям.

$$Q_{кат} = \frac{2,135 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 1976 \cdot 3,21 \cdot 1 + \frac{3182}{70000}}{2 \cdot 140,4 + 11,9} = 92,96 \text{ C}^\circ \quad (2.58)$$

Расчет превышения температуры катушки над маслом

$$Q_{кат.мс} = f_1 \cdot q_{кат}^{K_{кат}} + f_2 \cdot q_{кат} = 0,22 \cdot 92,96^{0,7} + 0,004 \cdot 92,96 = 5,6 \text{ C}^\circ \quad (2.59)$$

где, $f_1 = 0,147 \cdot [1 + (5 \cdot b_{кат} - 0,18)] =$

$= 0,147 \cdot (1 + (5 \cdot 0,1401 - 0,18)) = 0,22;$

$f_2 = 2,75 \cdot (t_{\theta} - 0,55 \cdot 10^{-3}) = 2,75 \cdot (0,002 - 0,00055) = 0,004;$

$K_{кат} = 0,7.$

Превышения температуры масла над воздухом исходя из норм нагрева масла

$$Q_{мс.ср} = \frac{[Q_{в.сл.м}]}{1,2 \cdot K_{тц}} = \frac{60}{1,2 \cdot 1,0724} = 46,5 \text{ C}^\circ \quad (2.60)$$

где, $K_{тц}$ – коэффициент, учитывающий взаимное расположение тепловых центров трансформатора.

$$K_{тц} = 1,179 \cdot \alpha_{тц}^2 - 1,375 \cdot \alpha_{тц} + 1,473 = 1,179 \cdot 0,6^2 - 1,375 \cdot 0,6 + 1,473 = 1,0724 \quad (2.61)$$

$$\alpha_{тц} = \frac{D_{ст} + h_{ня.б} + 0,5 \cdot H_{ст}}{H_{ст} + 2 \cdot D_{ст} \cdot 0,85} = \frac{0,73 + 0,15 + 0,5 \cdot 2,5052}{2,5052 + 2 \cdot 0,73 \cdot 0,85} = 0,6 \quad (2.62)$$

Превышения температуры масла над воздухом исходя из норм нагрева обмоток

$$Q_{mc.cp} = [Q_{обм}] - Q_{кат.mc} = 65 - 5,6 = 59,4^\circ\text{C} \quad (2.63)$$

Найдем высоту бака

$$H_6 = 2 * D_{ст} + H_{ст} + h_{ня.6} + h_{вя.6} = 2 * 0,73 + 2,5052 + 0,15 + 0,1 = 4,215 \text{ м} \quad (2.64)$$

Возьмем панельные радиаторы типа MRNG-(4000)N/520 , по 20 панелей с теплоотдающей поверхностью радиатора равной 83,2 м².

Определим полные потери реактора

$$P = P_{к.з} + P_{х.х} = 75169 + 22886 = 98055 \text{ Вт} \quad (2.65)$$

Удельная тепловая нагрузка поверхности бака

$$q_B = \left(\frac{Q_{mc.cp}}{0,262} \right)^{1,25} = \left(\frac{59,4}{0,262} \right)^{1,25} = 880 \text{ Вт/м}^2 \quad (2.66)$$

Тепловой поток отводимый поверхностью бака

$$Q_B = q_B \cdot \left[H_B \cdot P_B + \left(2 \cdot L_{мо} \cdot B_B + \frac{\pi \cdot B_B^2}{4} \right) \cdot 0,75 \right] =$$

$$= 880 * 4,215 * 11 + 2 * 0,155 * 1,9224 + \frac{3,14 * 1,9224^2}{4} * 0,75 =$$

$$= 43110 \text{ Вт} \quad (2.67)$$

Тепловой поток отводимый радиатором

$$Q_{рад} = P_{расч} - Q_B = 98923 - 43110 = 55813 \text{ Вт} \quad (2.68)$$

Удельная тепловая нагрузка радиатора

$$q_{рад} = \left(\frac{Q_{mc.cp}}{K_{охл}} \right)^{1,25} = \left(\frac{59,4}{0,42} \right)^{1,25} = 487,7 \text{ Вт/м}^2 \quad (2.69)$$

где, $K_{охл} = 0,42$ для системы охлаждения М.

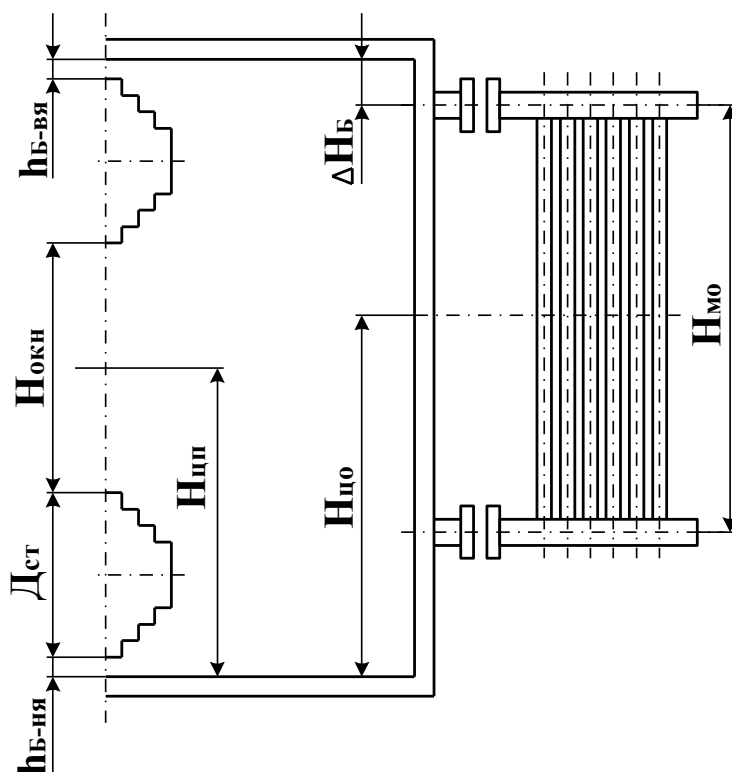


Рисунок 2.3 – примерная схема расположения радиатора на баке

Необходимое число радиаторов

$$n_{рад} = \left[\frac{Q_{рад}}{F_{рад} \cdot q_{рад}} \right]_{ц.б} = \frac{55813}{83,2 \cdot 487,7} = 2 \quad (2.70)$$

2.2.6 Расчет динамической стойкости обмоток при коротком замыкании

Кратности амплитуды ударного тока к.з. по отношению к

номиналу $K_{к.з} = 30$, $K_{уд} = \left(1 + \exp \left[- \frac{\pi \cdot U_{кз.а}}{U_{кз.р}} \right] \right) = 2$ - ударный коэффициент

учитывающий увеличение тока к.з. из-за наличия аperiodической составляющей

Ударный ток к.з., проходящий через каждый виток в катушки обмотки

СО

$$I_{к.з.уд} = I_{ном} \cdot K_{к.з} = 100 \cdot 30 = 3000 \text{ А} \quad (2.71)$$

Расчет механических напряжений в обмотках от радиальных сил.

Радиальные силы в пределах обмотки возникают при взаимодействии проходящего через проводник тока к.з. с осевым полем рассеяния, в котором находится проводник. Расчет ведется по среднему усилию, действующему на все провода в рассматриваемой катушке.

Из нескольких концентрически расположенных обмоток наружная всегда подвергается растяжению, а внутренняя – сжатию под действием радиальных сил. Расчет радиальных сил ведется для обмотки СО.

Средняя алгебраическая величина индукции осевого поля рассеяния при к.з. действующей по ширине катушки

$$B_{ос.ср.кз} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot \frac{B_{ос}}{2} = 2 * 10 * \frac{0,141}{2} = 1,41 \text{ Тл} \quad (2.72)$$

где, $K_{кз.уст}=10$.

Напряжение растяжения или сжатия в проводнике катушки

$$G_{рад} = \frac{B_{ос.ср.кз} \cdot I_{кз.уд} \cdot D_{ср}}{F_{обм}} = \frac{1,41 * 3000 * 1,3312}{0,7} = 8044 \text{ Н/м}^2 \quad (2.73)$$

Расчет механических напряжений в обмотках от осевых сил

Осевые силы в проводниках обмотки возникают при взаимодействии проходящего через проводник тока к.з. с радиальным полем рассеяния, в котором находится проводник. Расчет также ведется в предположении усреднения усилий, действующих на проводник рассматриваемой катушки.

Длина расчетного пролета

$$l_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{ср}}{n_{прокл}} - b_{прокл} = \frac{2 * 3,14 * 0,2912}{48} - 0,06 = 0,001 \text{ м} \quad (2.74)$$

Средняя алгебраическая величина индукции радиального поля рассеяния при к.з., действующего по высоте обмотки

$$B_{рад.ср.кз} = K_{уд} \cdot K_{кз.уст} \cdot 0,17 \cdot B_{ос} = 2 * 10 * 0,17 * 0,141 = 0,5 \text{ Тл} \quad (2.75)$$

Напряжение изгиба в каждом проводнике катушки определяется из рассмотрения пролета между прокладками катушки как балки с заземленными концами

$$G_{oc} = \frac{B_{рад.ср.кз} \cdot I_{кз.уд} \cdot l_o^2}{2 \cdot n_{нар} \cdot b_{np} \cdot h_{np}^2} = \frac{0,5 \cdot 3000 \cdot 0,001^2}{2 \cdot 2 \cdot 0,005 \cdot 0,01^2} = 750 \text{ Н/м}^2 \quad (2.76)$$

Суммарные напряжения в проводнике от радиальных и осевых сил не должны превышать допустимого напряжения

$$G = G_{рад} + G_{oc} \leq [G] = 750 + 8044 = 8794 \text{ Н/м}^2 \quad (2.77)$$

- допустимые напряжения для медного транспонированного провода
 $[G] = 2,36 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$

Критическая радиальная нагрузка P_k для круговой балки, действующая на единицу длины балки

$$P_k = K_y \frac{E_{np} \cdot I_{np}}{D_{cp}^3} = 575 \frac{2,3 \cdot 2,25}{1,3312} = 2235 \text{ Н/м}^2 \quad (2.78)$$

где, E_{np} – модуль упругости проводника для медного транспонированного провода $E_{np} = 2,3 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

I_{np} – момент инерции сечения проводника обмотки

$$I_{np} = \frac{h_{np} \cdot b_{np}^3}{12} = \frac{0,01 \cdot 0,003^3}{12} = 2,25 \cdot 10^{-11} \text{ Н/м} \quad (2.79)$$

K_y – коэффициент устойчивости круговой арки, зависящий от раствора концов арки, определяемого центральным углом и характером потери устойчивости арки, определяемого числом полувольт “ n ”, возникающих по длине арки при потере устойчивости

$$K_y = \left(\frac{n_{прок}}{2} \right)^2 - 1 = \left(\frac{48}{2} \right)^2 - 1 = 575 \quad (2.80)$$

Критическое напряжение в проводнике G_k , соответствующее критической радиальной нагрузке P_k .

$$G_k = \frac{K_y \cdot E_{np} \cdot b_{np}^2}{12 \cdot R_{cp}^2} = \frac{575 \cdot 2,3 \cdot 10^{11} \cdot 0,003^2}{12 \cdot 1,3312^2} = 5,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2 \quad (2.81)$$

Критерий устойчивостью обмотки, подвергающейся сжатию выполняется $G_{рад} \leq G_k$.

2.2.7 Выбор расширителя

Расширитель служит для защиты масла в преобразователе от увлажнения и окисления. При наличии расширителя значительно уменьшается увлажнение и окисление масла, т.к. поверхность масла в расширителе значительно меньше, чем в баке реактора, не имеющего расширителя, и, следовательно, меньше поверхность соприкосновения масла с воздухом. Поэтому все реакторы мощностью 25 кВА и более снабжаются расширителями.

Емкость расширителя с учетом колебаний температуры окружающего воздуха от -45 до $+40^\circ\text{C}$ составляет примерно 10% объема масла в трансформатора. Для определения массы масла в баке необходимо знать внутренний объем гладкого бака. V_B и объем, занимаемый активной частью $V_{a.ч.}$

$$V_B = B_B \cdot L_B \cdot H_B = 1,9442 \cdot 3,6 \cdot 4,215 = 29,5 \text{ м}^3 \quad (2.82)$$

$$V_{a.ч.} = \frac{1,2 \cdot (G_{np} + G_{cm})}{\gamma_{a.ч.}} = \frac{1,2(7351,4 + 21374)}{6000} = 5,75 \text{ м}^3 \quad (2.83)$$

$\gamma_{a.ч.} = 5500 \div 6000 \text{ кг/м}^3$ – средняя плотность активной части для трансформатора с медными обмотками

Общую массу масла можно определить по формуле

$$G_{\text{масла}} = 1,05 \cdot [0,9 \cdot (V_B - V_{a.ч.}) \cdot 10^3 + G_{\text{м.эл}}] = 22920 \text{ , кг} \quad (2.84)$$

где, 1,05 – коэффициент, учитывающий массу масла в радиаторах,

$G_{\text{м.эл}} = n_{\text{рад}} \cdot G_{\text{м.рад}}$ – масса масла в радиаторах – элементах систем охлаждения силовых трансформаторов.

Стандарт установил нормализованный ряд объемов расширителей. Диаметры расширителей определены в зависимости от выбранных объемов расширителей с учетом безотходного раскроя стандартного листа стали. Заводы изготавливают расширители семи диаметров, а на каждый диаметр приходится несколько длин. Отношение длины расширителей к их диаметру находится в пределах 1,5...4.

Расширитель снабжается указателем уровня масла и на нем наносятся три контрольные черты, соответствующие уровню масла в неработающем реакторе при температурах воздуха -45 , $+15$ и $+40^{\circ}\text{C}$. Расстояния от нижней части расширителя до контрольных отметок зависят от диаметров расширителей

На рисунке и таблице указаны основные данные расширителей. Располагается расширитель чаще всего вдоль узкой стороны реактора, слева от бака, если смотреть на реактор со стороны вводов CO .

Таблица 2.1 - Расстояния от нижней части расширителей до контрольных отметок

Исполнение	Диаметр расширителя D,	Расстояние от нижней части расширителя до контрольных отметок		
		h_1	h_2	h_3
Умеренный климат контрольными отметками -45° , $+15^{\circ}$, $+40^{\circ}$ С	690	100	335	420
	940	100	430	590
	1260	100	615	795
	1570	100	800	1040

Соответственно выбираем расширитель диаметром 1260 мм, толщиной стенок 4 мм, длиной в 2000 мм, количество условных проходов маслопровода 80 штук, объем расширителя 2500 л, масса масла в расширителе 1065 кг.

3 Технологическая часть

3.1 Особенности радиально шихтованных и эвольвентных стержней реакторов

При создании реакторов возникали большие проблемы с нагревом магнитопровода при использовании обычных стержней это было обусловлено вхождением линий магнитной напряженности в плоскость листа пакета стержня которые приходила из выпуклого магнитного зазора между стальными вставками реактора с зазорами в стержне, распространение магнитного поля в зазорах можно увидеть на рисунке 3.1.

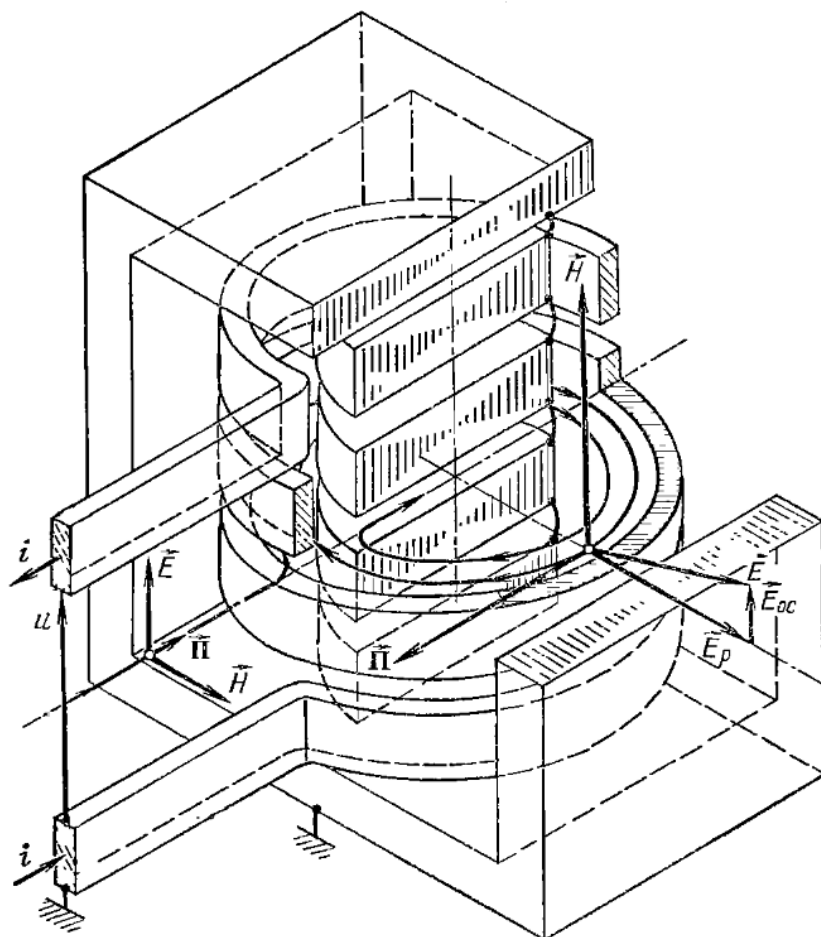


Рисунок 3.1 – Путь потока мощности в стержне реактора с зазорами а также распространение векторов магнитной и электрической напряженности вне проводника

Поэтому в современных реакторах еще на этапе проектирования закладывают эвольвентный либо радиально шихтованный стержень с центральным соединением заземленных частей.

Сравнить картины распространения мощности можно на рисунке 3.2, картина распространения потоков мощности в радиально шихтованном стержне с центральным соединением заземленных частей можно посмотреть на рисунке 2.1.

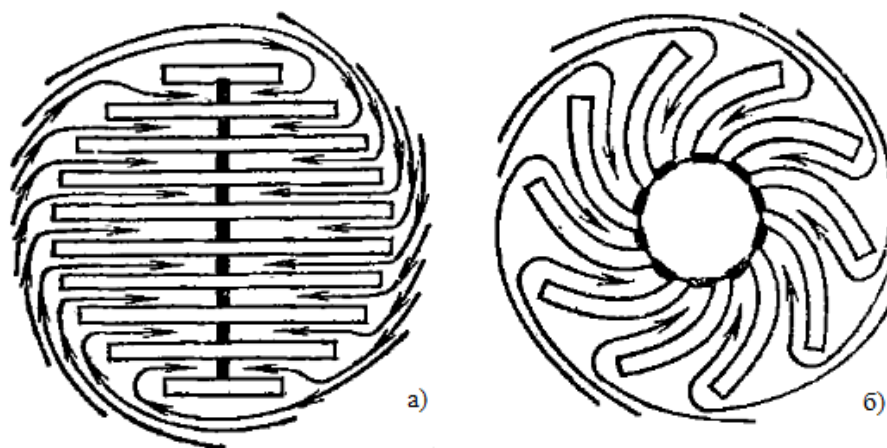


Рисунок 3.2 – Картина потоков мощности в зазоре стержневого реактора при схеме шихтовке а)плоской, б)эвольвентной

Создание и заполнение сталью радиально шихтованного стержня обусловлено заданием основных пластин которые будут делить стержень на зоны, подобно прокладкам в трансформаторе, количество которых зависит от размеров стержня. Далее идет заполнение остальных участков сталью, обычно укладывается так же в несколько слоев чтобы увеличить заполнение стержня сталью, пример показан на рисунке 3.3.

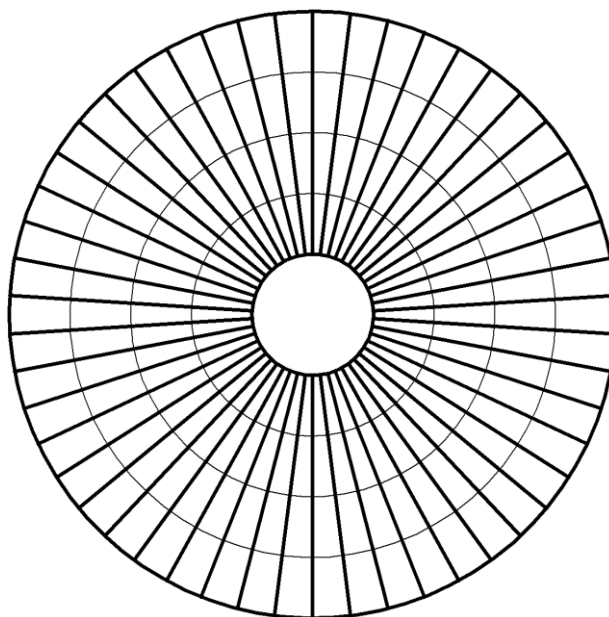


Рисунок 3.3 – Примерная схема дробления на зоны заполнения радиально шихтованного стержня

3.2 Включение реактора в сеть высоковольтных линий

Линию электропередач можно представить в виде схемы замещения как показано на рисунке 3.4, с распределенными параметрами—индуктивностью, емкостью и сопротивлением.

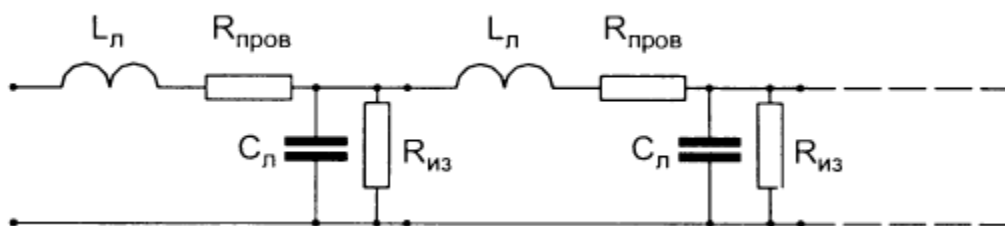


Рисунок 3.4 - Схема замещения высоковольтной линии где, $L_{л}$ – индуктивность линии, $C_{л}$ – емкость линии, $R_{пров}$ – сопротивление провода, $R_{из}$ - сопротивление изоляции

При удалении от начала напряжение и ток меняются по амплитуде и фазе, при чем напряжение увеличивается не линейно ,а по растянутой параболе. В реальных линиях при наличии в конце линии нагрузки, и при

мощности нагрузки равной $P = U^2/Z$ напряжение во всех точках линии становится номинальным. Такая мощность называется натуральной.

При передаче меньше этой мощности и наличии емкостных нагрузок, напряжение в начале и в конце линии может быть одинаковым, однако в промежуточных точках оно будет больше этого значения. Обусловлено это будет тем что от концов линии к середине будут течь емкостные токи, это опасно для линии ,а так же увеличивает потери и уменьшают пропускную способность и устойчивость параллельной работы энергосистем. Включение шунтирующих реакторов компенсирует емкость линии и устраняет эти недостатки, однако реакторы можно установить только в ограниченном числе точек в основном по концам и в середине линии. Необходимая мощность будет тем больше ,чем меньше число точек подключения. Так при длине линии 1 Мм необходимо поставить реактор на одном конце линии мощностью 1.73 натуральной, на двух концах 1.16, в трех точках 1.075.

Так же шунтирующий реактор может работать в линии как защитное устройство в таких случаях как:

- самовозбуждение генераторов;
- феррорезонанс трансформаторов;
- коммутационные импульсы;
- несимметричные короткие замыкания.

3.3 Инженерные расчеты

3.3.1 Расчет освещения участка сборки остова реактора.

Для нормальной жизнедеятельности человека, особенно в условиях производства, важную роль играет качество освещения. Освещение производственных помещений и рабочих мест может быть естественным, искусственным и совмещенным.

Естественный (солнечный) свет оказывает положительное воздействие на зрение и в целом на организм человека. Поэтому естественное освещение

применяют в основном в помещениях с постоянным пребыванием людей. Его подразделяют на, боковое, верхнее и комбинированное (в нашем случае боковое и верхнее). Нормируется оно значением коэффициента естественной освещенности (КЭО) в соответствии со СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» .

Искусственное освещение осуществляется с помощью электрических источников света – ламп накаливания, люминесцентных или иных газоразрядных ламп.

Расчет искусственного освещения в помещениях можно производить следующими методами: точечным, ватт, графическим и коэффициента использования светового потока. Задача расчета состоит в выборе типа и количества светильников, мощности устанавливаемых в них ламп, а также правильной их расстановке в помещениях с учетом требуемой высоты подвеса.

При расчете освещения воспользуемся методом коэффициента использования светового потока, который наиболее применим для расчета общего равномерного освещения в условиях эксплуатации промышленных предприятий.

Данные для расчета:

длина участка – 25 м;

ширина участка – 10 м;

площадь участка – 250 м²;

цвет окраски: потолок – серый, стен – белый.

высота подвеса светильников – 15 м; применяются газоразрядные лампы;

оборудование расположено у стены с проходом посередине цеха.

Минимальная нормированная освещенность рабочего места $E = 300$ лк;

Коэффициент запаса $K = 1.5$;

Коэффициент, учитывающий неравномерность освещения $Z = 1.15$;

Тип лампы – газоразрядные лампы типа ДРЛ 700, мощностью 700 Вт, световым потоком равным 38500 лм.

Индекс помещения

$$i = a \cdot b / h \cdot (a+b) = 20 \cdot 10 / 15 \cdot (20+10) = 0,5 \quad (3.1)$$

где, $a = 25\text{м}$ – длина участка;

$b = 10\text{м}$ – ширина участка;

$h = 15\text{м}$ высота подвеса светильников.

Учитывая состав среды в помещении, подбираем светильник типа СДДРЛ.

Коэффициент отражения:

потолка (серый) $\rho_{\text{п}} = 30\%$

стен (белый) $\rho_{\text{с}} = 70\%$

рабочей поверхности $\rho_{\text{рп}} = 10\%$

Коэффициент использования светового потока

$$\eta = 0,36$$

Количество светильников

$$N = E \cdot S_{\text{н}} \cdot K \cdot Z / \Phi \eta = 300 \cdot 250 \cdot 1.5 \cdot 1.15 / 38500 \cdot 0.36 = 10 \text{ шт} \quad (3.2)$$

Схема расположения светильников представлена на рисунок 3.5.

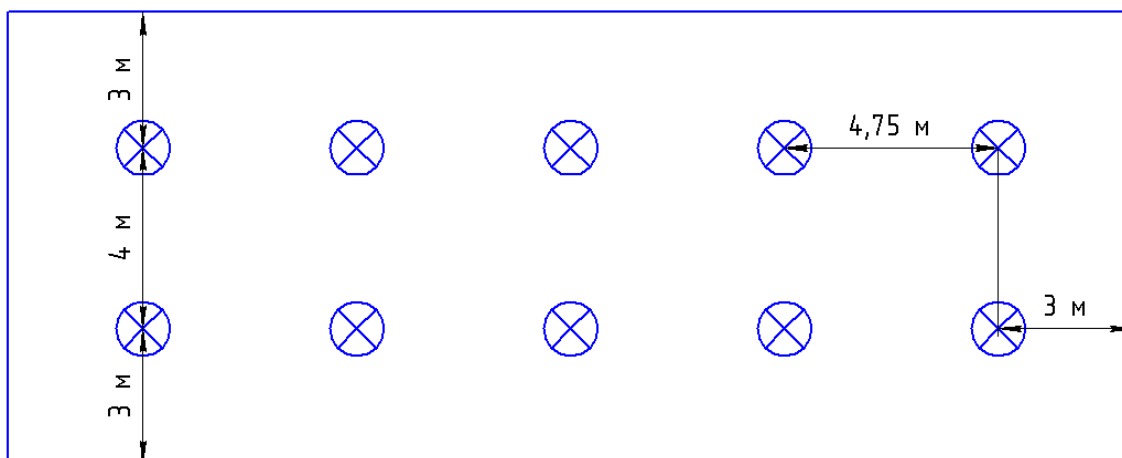


Рисунок 3.5 – Схема расположения светильников

3.3.2 Расчет заземления участка сборки остова реактора.

В качестве искусственных заземлителей примем вертикально расположенные электроды. Диаметр электрода примем равным $d=0,01\text{ м}$ и длиной $l=8\text{ м}$. Для связи вертикальных электродов и в качестве самостоятельного горизонтального электрода используем сталь круглого сечения диаметром $d=0,01\text{ м}$.

Сопротивление растекания тока с одного стержневого заземлителя у поверхности грунта:

$$R_1 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 8} \cdot \ln \frac{4 \cdot 8}{0,01} = 14,8 \text{ Ом} \quad (3.3)$$

Необходимое количество параллельно соединенных заземлителей:

$$n = \frac{R_1}{R_{\text{д}}} = \frac{14,8}{4} = 3,7 \quad (3.4)$$

Принятое количество параллельно соединенных заземлителей:

$$n = 4.$$

Длина соединительного проводника:

$$l = 1,05 \cdot m \cdot (n - 1) = 1,05 \cdot 4 \cdot (4 - 1) = 13 \text{ м} \quad (3.5)$$

где, m – расстояние между электродами, $m=4 \text{ м}$.

Сопротивление растекания тока с одного стержневого заземлителя протяженного в грунте:

$$R_{\text{д}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{d \cdot t} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 13} \cdot \ln \frac{13^2}{0,01 \cdot 1} = 11 \text{ Ом} \quad (3.6)$$

Сопротивление растекания тока искусственного заземлителя:

$$R_{\text{и}} = \frac{R_1 \cdot R_{\text{д}}}{R_1 \cdot \eta_{\text{г}} + R_{\text{д}} \cdot n \cdot \eta_{\text{в}}} = \frac{14,8 \cdot 11}{14,8 \cdot 0,55 + 11 \cdot 4 \cdot 0,78} = 3,8 \text{ Ом} \quad (3.7)$$

где, $\eta_{\text{г}}$ - коэффициент использования горизонтального электрода с учетом вертикальных электродов, $\eta_{\text{г}}=0,55$;

$\eta_{\text{в}}$ - коэффициент использования вертикальных электродов, учитывающий их взаимное экранирование, $\eta_{\text{в}}=0,78$.

Полученное сопротивление искусственных электродов не превышает требуемого сопротивления, $R_{\text{и}} \leq R_{\text{д}}=3,8(\text{Ом}) \leq 4(\text{Ом})$.

3.4 Экономическое обоснование

При повышении потребляемой мощности необходимо решить перегрузку линий электропередач, можно заменить кабель силовых линий на кабель с большим сечением при стоимости в километре кабеля 45 тысяч рублей, длина линии примерно тысяча километров т.е. для трех фазной вл это обойдется в 135 миллионов рублей. Либо поставить шунтирующий реактор который компенсирует реактивную мощность и позволит нагрузить линию еще, при этом стоимость самых мощных реакторов ограничивается пятидесятью миллионами рублей.

Заключение

В выпускной квалификационной работе был разработан шунтирующий реактор типа РОМ-60000/500 с обмоткой СО из медного провода. Реактор предназначен для длительной работы при стационарной установке на открытом воздухе на высоте не более 1000 м над уровнем моря. Климатическое исполнение и условия эксплуатации по ГОСТ Р 52719 и ГОСТ 15150-69 для умеренного (У) и приближенного к холодному (УХЛ) климата. Область применения – компенсация реактивных мощностей в высоковольтных линиях электропередач.

По аналогу и индуктивности а также ряду эффективном сечениям стержня на данную мощность определяем только диаметр стержня, а все остальные параметры данного реактора рассчитываются.

Проделанный расчет отличается от аналога моделью реактора формой бака. Новый реактор отвечает заданным характеристикам.

В электромагнитном расчете выбраны индукция в магнитопроводе равная 1.72 Тл рекомендуемая производителем, число витков в обмотках, тип обмоток, размеры обмоточных проводов. В результате были получены следующие результаты:

- высота обмотки СО равна $H_{\text{обм}} = 2365,2$ мм;
- напряжение короткого замыкания составляет 1,005%.
- потери холостого хода уменьшались и составили 22886 Вт;
- ток холостого хода уменьшился и составил 10 А;
- потери короткого замыкания уменьшились и составили 76037 кВт.

Расчет обмоток на общий перегрев и на перегрев наиболее нагретых точек, показал, что температура не превышает допустимых значений.

В динамическом расчете обмоток проверена устойчивость последних на растяжение и сжатие при коротком замыкании.

Список использованных источников

1. Терентьева, М.А. Расчет силовых масляных трансформаторов / М.А. Терентьева, Ю.И. Борю, Е.М. Леунова.- Тольятти: ТГУ, 2006. – 116 с.
2. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 2006. – 528 с.: ил.
3. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек.- Л.: «Энергия» 2008. – 765 с.
4. Кацман, М.М. Справочник по электрическим машинам.- М.: АКАДЕМА, 2005. – 479 с.
5. Либкинд, М.С. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем / М.С. Либкинд, А.К. Червонец.- М.: Энергия, 2008. – 80 с.
6. Долгополов, А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы / А.Г. Долгополов. М.: ИД «Энергия» 2014. – 118 с.
7. Лейтс, Л.В.. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтс.- М.: Энергия, 2006. – 392 с.
8. Бессонов, Л.А.. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. М.: «Гардарики», 2006. – 685 с.
9. Бессонов, Л.А. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов.- М.: «Гардарики», 2008. – 317 с.
10. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов.- М.: «Юрайт», 2011. – 767 с.
11. Серебряков, А.С.. Трансформаторы / А.С. Серебряков.- М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 360 с.
12. Н.Р. Moser. Transformer boards. I, Switzeland: H.Weidmann AG. Rapperswil 2007. – 216 с.
13. Н.Р. Moser. Transformer boards. II, Switzeland: H.Weidmann AG. Rapperswil 2007. – 143 с.

14. Долгополов, А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы [Электронный ресурс] / Новости электротехники. - 2009 №6(60). Режим доступа <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/60/06.php> (Дата обращения 15.03.16)

15. L. David, P.E. Harris. Transformer winding design the design and performance of circular disc, helical and layer windings for power transformer applications. [Электронный ресурс] / Minnesotapowersystemsconference 2009 Режим доступа <http://www.compow.com/pdfs/MIPSYCON%2011-03-09%20-%20Winding%20Design%20issues%20%20Disk,%20Helical%20&%20Layer%20Windings.pdf> (Дата обращения 18.04.16)

16. Electromagnetic process in high-power D.C. controlled reactors. M.A.Biki, E.N.Brodovoi, A.M.Bryantsev, Yu.L.Chizhevsky, L.V.Leites, A.I.Lurie. In: "International symposium on electromagnetic fields in electrical engineering. Sept. 18-20, 2010, Southampton University, England, ISEF-91". Warszawa, 2010, P.245-248.

17. G. Bertagnolli. Short-circuit duty of power transformers. – Legnano (Milano) Italy, – ABB Transformatori, 2008. – 200 с.

18. Брускин, Д.Э. Электрические машины [Электронный ресурс] / Д.Э. Брускин. Режим доступа http://www.induction.ru/library/book_002/glava6/6-16.html (Дата обращения 21.04.16)

19. Allen, J.P.C. "Starting Now: A review of reduced voltage ac motor starters.," Proc. IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference Charlotte, NC, May 2012, pp. 1-10.

20. Lukitsch, W.J., "Soft Start Vs AC Drives – Understanding the Differences," Proc. IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference Atlanta, GA, May 2012, pp. 1-5.