

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им А.Р. БЕРУНИ**

На правах рукописи

Рабеков Равшан Юлдашевич

«Расчет и конструирование трехфазного масляного двухобмоточного трансформатора мощностью 5600 кВА, напряжением 35/6 кВ для подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат»

Специальность: 5А310701- «Электромеханика»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание степени магистра «Электромеханика»

Научный руководитель: д.т.н., проф. Пирматов Н.Б.

ТАШКЕНТ – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОДНОФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ	
1.1. Общее соображение.....	11
1.2. Устройство трансформатора.....	16
1.3. Принцип работы трансформатора.....	22
1.4. Обозначения, схемы и группы соединения обмоток трансформатора.....	23
Глава 2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ И ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА МОЩНОСТЬЮ 5600 кВА	
2.1. Расчёт основных электрических величин и изоляционных расстояний.....	27
2.2. Определение исходных данных расчёта.....	28
2.3. Расчёт основных коэффициентов.....	30
2.4. Определение основных размеров.....	31
2.5. Расчет обмотки НН.....	31
2.6. Расчет обмотки ВН.....	34
2.7. Расчет эксплуатационных характеристик силового трансформатора мощностью 5600 кВА, напряжением 35/6 кВ для подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат».....	38
Вывод.....	40
Заключение.....	40
Использованная литература.....	41

Введение

Актуальность работы. Трансформаторы – это наиболее распространённые устройства в современной электротехнике. Трансформаторы большой мощности составляют основу систем передачи электроэнергии от электростанций в линии электропередачи. Они повышают напряжение переменного тока, что необходимо для экономной передачи электроэнергии на значительные расстояния. В местах распределения энергии между потребителями применяют трансформаторы, понижающие напряжение до требуемых для потребителей значений. Наряду с этим трансформаторы являются элементами электроустановок, где они осуществляют преобразование напряжения питающей сети до значений, необходимых для работы последних.

Принцип действия и способ применения однофазного трансформатора был описан в 1876 году русским электротехником и изобретателем Яблочковым П.Н.

Русский электротехник, создатель техники трехфазного тока М. Доливо-Добровольский в 1890 г. Предлагает конструкцию трехфазного трансформатора, который в трехфазной сети позволит заменить три однофазных агрегата.

На рубеже XIX и XX веков дальнейшее развитие электроэнергетики стали ориентировать на применение переменного тока высокого напряжения в противовес концепциям в пользу постоянного тока и техники низких напряжений.

Прогресс трансформаторостроения в XX веке как у нас в стране, так и за рубежом в основном характеризовался следующими направлениями:

- а) обеспечение повышения предельных параметров трансформаторов в связи с ростом мощности энергосистем и энергоблоков;
- б) снижение размеров, массы и потерь энергии в каждом трансформаторе определенной мощности и класса напряжения.

Существенный вклад в развитие теории трансформаторов и методов их проектирования внесли ученые Г.Н. Петров, П.М Тихомиров и другие. Трансформаторостроение в конце XX века вышло на очень высокий уровень развития. Прогресс в технико-экономических показателях трансформаторов в первую очередь обусловлен улучшением качества активных и изоляционных материалов, а также конструктивными достижениями, реализуемыми через так называемую параметрическую и структурную оптимизацию. Первая позволяет находить наилучшие значения параметров, вторая – наиболее рациональные конструктивные схемы взаимного расположения деталей и узлов трансформатора.

Как известно, материалы, используемые при производстве трансформаторов, подразделяются на активные, изоляционные и конструкционные. В качестве активных материалов применяются:

- электротехническая сталь – для изготовления магнитопровода;
- медь или алюминий - для изготовления обмоток.

Одним из основных активных материалов трансформатора является тонколистовая электротехническая сталь. В течение многих лет для магнитных систем трансформаторов применялась листовая сталь горячей прокатки с толщиной листов 0,5 или 0,35 мм. Качество этой стали постепенно улучшалось, однако удельные потери в ней были высоки.

Появление в конце 40-х годов холоднокатаной текстурованной стали, т.е. стали с определенной ориентировкой зерен (кристаллов), имеющей значительно меньшие удельные потери и более высокую магнитную проницаемость, позволило увеличить индукцию в магнитной системе и существенно уменьшить массу активных материалов при одновременном снижении потерь энергии в трансформаторе. Вместе с этим было получено сокращение расхода остальных материалов – изоляционных, конструкционных, масла и т.д.

Применение холоднокатаной стали позволило также уменьшить внешние габариты и увеличить мощность трансформатора в одной единице, что особенно важно для трансформаторов большой мощности, внешние размеры которых ограничиваются условиями перевозки по железным дорогам.

Одной из существенных особенностей холоднокатаной стали является анизотропия ее магнитных свойств, т.е. различие этих свойств в разных направлениях внутри листа или пластины стали. Наилучшие магнитные свойства (наименьшие удельные потери и наибольшую магнитную проницаемость) эта сталь имеет в направлении прокатки.

Конструкция магнитной системы трансформатора с учетом анизотропии магнитных свойств холоднокатаной стали должна быть выполнена так, чтобы во всех ее частях стержнях и ярмах – вектор индукции магнитного поля имел направление, совпадающее с направлением прокатки стали.

Существенно улучшить параметры трансформаторов можно посредством перехода на так называемые аморфные стали. Однако технологии подобного перехода пока не отработаны. Отдельные изготовленные за рубежом образцы с магнитопроводами из аморфной стали слишком дороги, что не позволяет пока говорить о ее массовом использовании при производстве трансформаторов.

Другой активный материал трансформатора – металл обмоток – в течение долгого времени не подвергался изменению. Низкое удельное электрическое сопротивление, легкость обработки (намотки, пайки), удовлетворительная стойкость по отношению к коррозии и достаточная механическая прочность электролитической меди сделали ее единственным материалом для обмоток трансформаторов в течение ряда десятилетий. Несмотря на это, относительно малое мировое распространение природных запасов медных руд заставило искать пути замены меди другим металлом, и в первую очередь, алюминием, более широко распространенным в

природе. При переходе на алюминиевые обмотки был решен ряд задач технологического характера, связанных с технологией намотки алюминиевых обмоток, пайкой и сваркой алюминия. В настоящее время все новые серии трансформаторов общего назначения мощностью до 16 000 кВА включительно проектируются с алюминиевыми обмотками.

Открытие в 80-х годах проводниковых материалов, обладающих свойством высокотемпературной сверхпроводимости, открыло новые перспективы создания трансформаторов меньших габаритов со сниженными потерями. Удалось преодолеть главное препятствие использования сверхпроводимости: громоздкие криогенные системы для получения жидкого гелия были заменены простыми установками жидкого азота при атмосферном давлении. Именно это направление совершенствования конструкции трансформаторов может рассматриваться в качестве одного из наиболее перспективных.

Главным изоляционным материалом в силовых трансформаторах является трансформаторное масло – жидкий диэлектрик, сочетающий высокие изоляционные свойства со свойствами активной охлаждающей среды и теплоносителя.

В качестве изоляции обмоточного провода (медного или алюминиевого) используется кабельная бумага, которая имеет класс А нагревостойкости. Применение более нагревостойкой изоляции в масляных трансформаторах смысла не имеет, так как именно наличие масла ограничивает предельные температуры. В сухих силовых трансформаторах, где охлаждение обеспечивается воздухом, класс нагревостойкости обмоточной изоляции более высокий (В, F и т.д.).

Основные части трансформатора – это магнитопровод и обмотки. Магнитопровод трансформатора выполняют из листовой электротехнической стали. Перед сборкой листы с двух сторон изолируют. Такая конструкция магнитопровода дает возможность в значительной степени ослабить в нем вихревые токи и, в конечном итоге, увеличить

коэффициент полезного действия. Часть магнитопровода, на которой располагают обмотки, называют стержнем.

Цель работы. Основной целью работы является рассчитать и конструировать трехфазного масляного двухобмоточного трансформатора мощностью 5600 кВА, напряжением 35/6 кВ для подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат».

Задачи исследований:

1. Определение основных электрических величин:
 - линейных и фазных токов и напряжений обмоток ВН и НН;
 - испытательных напряжений обмоток;
 - активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания.

2. Расчет основных размеров трансформатора:
 - выбор схемы, конструкции и технологии изготовления магнитной системы;
 - выбор марки и толщины листов стали и типа изоляции пластин, индукции в магнитной системе;
 - выбор материала обмоток;
 - предварительный выбор конструкции обмоток;
 - выбор конструкции и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток;
 - предварительный расчет трансформатора и выбор соотношения основных размеров β с учетом заданных значений U_k , P_k и P_x ;
 - определение диаметра стержня и высоты обмотки, предварительный расчет магнитной системы.

3. Расчет обмоток ВН и НН:
 - выбор типа обмоток ВН и НН;
 - расчет обмотки НН;
 - расчет обмотки ВН.

4. Определение параметров короткого замыкания:
 - потерь короткого замыкания – основных и добавочных в обмотках, добавочных в элементах конструкции;
 - напряжения короткого замыкания.
5. Окончательный расчет магнитной системы. Определение параметров холостого хода:
 - размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма;
 - массы стержней и ярм и массы стали;
 - потерь холостого хода;
 - тока холостого хода.
6. Тепловой расчёт и расчёт системы охлаждения:
 - поверочный тепловой расчет обмоток;
 - расчет системы охлаждения (бака, радиаторов, охладителей);
 - превышение температуры обмоток и масла над воздухом.

7. Определение габаритных размеров трансформатора.

Дан трёхфазный двухобмоточный масляный трансформатор.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются трехфазный трансформатор подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат».

Методы исследований. При выполнении диссертационной работы использовались методы теорий электрических машин, математической статистики и теорий надежности.

Научная новизна:

- рассчитан трехфазный силовой трансформатор подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат»;
- конструирован трехфазный силовой трансформатор подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат».

Научная и практическая значимость результатов работы:

- результаты исследований могут быть использованы на подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат»;

Публикация по работе. Основные научные результаты диссертации изложены в 2 научных работах.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 59 страниц, включает 27 рисунков, 6 таблиц, оглавление и библиографический список из 29 наименований.

Номинальная мощность	$S_n = 5600$ кВА
Число фаз	$m = 3$
Частота	$f = 50$ Гц
Номинальные напряжения: Обмотки ВН Обмотки НН	$U_{н2} = 35000$ В $U_{н1} = 6000$ В
Схема и группа соединений	Y/Δ-11
Напряжение короткого замыкания	$U_k = 6,95\%$
Потери короткого замыкания	$P_k = 55200$ Вт
Потери холостого хода	$P_x = 16300$ Вт
Ток холостого хода	$I_o = 3,1\%$
Материал обмоток	Медь

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРЕ

1.1. Общее соображение

Трансформатор - это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования (понижения или повышения) напряжения в сетях переменного тока.

Первый в мире трансформатор был создан русским инженером Яблочковым П.Н., который в 1876 высказал идею о возможности трансформации переменного тока, а в 1885 г. предложил передавать электроэнергию на значительные расстояния, используя для этой цели высокое напряжение переменного тока.

В простейшем виде трансформатор представляет собой устройство, в котором на сердечник С, собранный из пластин электрической стали, намотаны две обмотки (рисунок №1). Одна из которых – первичная I – подключена к источнику энергии, к другой - вторичной II- присоединен потребитель – нагрузка Н.

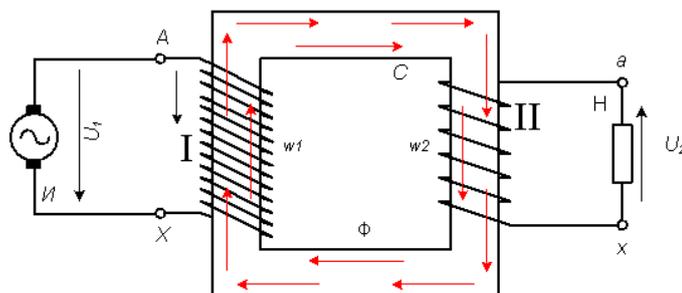


Рисунок №1 Схема однофазного трансформатора

И - источник энергии – генератор;
 С - стальной сердечник
 I и II - первичная и вторичная обмотки,
 Н - нагрузка

Ток, протекающий в первичной обмотке от источника энергии, создает в сердечнике переменный магнитный поток Φ , индуктирующий во вторичной обмотке электродвижущую силу. Для любого трансформатора отношение напряжений первичной U_1 и вторичной U_2 обмоток при холостом ходе приблизительно равно отношению чисел их витков:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} = k, \quad (1)$$

где w_1 и w_2 – соответственно число витков первичной и вторичной обмоток. Отношение (1) принято называть *коэффициентом трансформации*.

Если напряжение вторичной обмотки больше чем подведенное к первичной, то трансформатор называют *повышающим*; в противном случае, когда вторичное напряжение меньше первичного, - *понижающим*. Один и тот же трансформатор можно использовать в качестве понижающего и повышающего. Значение коэффициента трансформации, указанное в паспорте трансформатора, определено как отношение высшего напряжения к низшему.

Мощности в первичных и во вторичных обмотках примерно равны между собой. Таким образом, для однофазного трансформатора

$$P = U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2 \quad (2),$$

где I_1 и I_2 – соответственно ток в первичной и во вторичной обмотках.

Тогда коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \quad (3),$$

Следовательно, токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны напряжениям, а значит, и числам витков. Поэтому обмотку высшего напряжения всегда делают из большего числа витков провода меньшего сечения, тогда как обмотку низшего напряжения выполняют из меньшего числа витков провода большего сечения.

По числу фаз трансформаторы разделяют на *однофазные* и *трехфазные*. По назначению различают *силовые* (предназначенные для передачи и распределения электрической энергии) и *специальные* (сварочные, измерительные, печные, испытательные, инструментальные и тд.) трансформаторы.

По способу охлаждения классификация такова: трансформаторы с *воздушным, масляным*, а также с *масляным и принудительным воздушным* охлаждением.

Сердечник и ярма трансформаторов набирают из отдельных листов специальной электрической стали, хорошо проводящей магнитные потоки. Листы стали изолируют друг от друга. Это уменьшает вихревые потоки в сердечнике, снижает тепловые потери энергии в нем, а вследствие этого увеличивается коэффициент полезного действия трансформатора.

Для трансформирования трехфазного тока можно использовать группу, составленную из трех однофазных трансформаторов (рисунок №2, а), или один трехфазный трансформатор (рисунок №2, б). Трехфазная группа однофазных трансформаторов имеет ряд существенных недостатков: громоздкость, большая масса, высокая стоимость. Поэтому такой способ трансформации применяют только при очень больших мощностях (свыше 10 кВ·А), когда конструкция трехфазного трансформатора получается излишне громоздкой.

Сердечник трехфазного трансформатора состоит из трех вертикальных стержней, которые по концам замкнуты стальными ярмами.

На каждом из сердечников помещают первичную и вторичную обмотки одной из трех фаз.

Трансформатор называется силовым, если он применяется для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках, предназначенных для приёма и использования электроэнергии. К силовым относятся трансформаторы трёхфазные и многофазные мощностью 6,3 кВа и более, однофазные мощностью 5 кВа и более. При меньших мощностях трансформаторы называются трансформаторами малой мощности. Различают силовые трансформаторы общего назначения, предназначенные для включения в сети, не отличающиеся особыми условиями работы, или для непосредственного питания электроприёмников, не отличающихся особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы, силовые трансформаторы специального назначения для непосредственного питания сетей или приёмников электроэнергии, если эти сети или приёмники отличаются особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы (подземные рудничные и шахтные сети и установки, выпрямительные установки, электрические печи и т.д.).

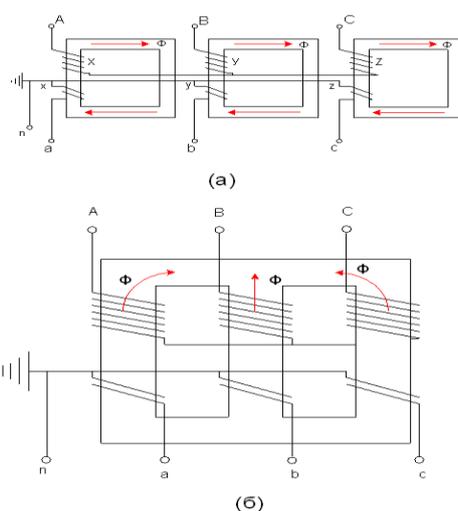


Рисунок №2 Группа из трех однофазных трансформаторов (а) и эквивалентный им трехфазный трансформатор (б):

А, В, С – выводы фаз высшего напряжения ;
 а, в, с – выводы фаз низшего напряжения ;
 n - нулевой провод (нейтраль)

В зависимости от числа обмоток различают двухобмоточные (в том числе, с расщеплённой обмоткой низшего напряжения) и трёхобмоточные трансформаторы. Последние применяются при сочетаниях напряжений 220/35/10(6) кВ и 110/35/10(6) кВ. Двухобмоточные понижающие трансформаторы имеют номинальную мощность не более 16 МВА, а трансформаторы с расщеплённой обмоткой выпускают с номинальной мощностью 25 МВА и выше. Применение трансформаторов с расщеплённой обмоткой объясняется необходимостью уменьшения токов КЗ на стороне НН, а также уменьшения влияния КЗ в цепи одной расщеплённой обмотки на работу нагрузки, подключенной к другой расщеплённой обмотке. У двухобмоточных трансформаторов мощностью 25 МВА и более токи КЗ на стороне НН часто превышают 20 кА – номинальный ток отключения наиболее распространённых выключателей (вакуумных, элегазовых, маломасленных). Поэтому, начиная с номинальной мощности 25 МВА, на подстанции с двумя напряжениями (110 кВ и 10 кВ) следует выбирать трансформаторы с расщеплённой обмоткой.

Вид системы охлаждения трансформаторов обозначают буквами: М – естественное масляное; Д – естественное масляное с использованием дутьевых вентиляторов, встроенных в конструкцию масляных радиаторов; ДЦ – принудительное (с маслососом) масляное охлаждение с дутьевыми вентиляторами; С – сухой трансформатор без масла и специальных охладителей. У трансформаторов с номинальной мощностью до 2,5 МВА включительно буква Н означает: трансформатор с негорючим диэлектриком (совтолом). Буква З для ТМ означает, что трансформатор вместо расширителя имеет азотную подушку (защиту). У ТС буква З обозначает защищённое исполнение.

При работе в трансформаторе создаётся магнитное поле, которое для расчётов, определения параметров можно условно разделить на две части: основное поле и поле рассеяния. Основное поле характеризуется

магнитным потоком, который замыкается по магнитопроводу и сцеплён со всеми витками первичной и вторичной обмоток. Поток поля рассеяния замыкается частично или полностью вне магнитопровода и не сцеплён с витками всех обмоток.

Номинальной мощностью двухобмоточного трансформатора является номинальная мощность каждой из его обмоток, в трёхобмоточном трансформаторе – наибольшая их номинальных мощностей трёх его обмоток. За номинальное напряжение обмотки принимается напряжение между соответствующими зажимами, связанными с данной обмоткой при холостом ходе трансформатора.

Основные обозначения: S – мощность, ВА; S_{ϕ} – мощность на одну фазу, ВА; P_x – потери холостого хода Вт; E – действующее значение ЭДС, В; U – действующее значение напряжения, В; I – действующее значение тока, А; J – плотность тока, А/м²; Φ – рабочий магнитный поток, Вб; B – магнитная индукция, Тл; I_x, I_a, I_p – действующее значение тока холостого хода и его активная и реактивная составляющие, А; i_0 – ток холостого хода в процентах к номинальному, %; Z_1, Z_2 – полные сопротивления обмоток, Ом; $Z = r + jx$ – сопротивление фазы нагрузки, Ом; u_k, u_a, u_p – напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие, %; w – число витков в обмотке; m – число фаз; \cos – коэффициент мощности вторичной цепи; β – коэффициент загрузки (отношение фактической нагрузки к номинальной мощности). Индексы величин: n – номинальных; ϕ – фазных; p – относящихся к рассеянию; k – относящихся к короткому замыканию; v – относящихся к витку.

1.2. Устройство трансформатора

Магнитопровод. Трансформаторы в зависимости от конфигурации магнитопровода подразделяют на *стержневые, броневые и тороидальные*. В стержневом трансформаторе (рис. 213, а) обмотки 2 охватывают стержни магнитопровода 1; в броневом (рис. 213,б), наоборот,

магнитопровод 1 охватывает частично обмотки 2 и как бы бронирует их; в тороидальном (рис. 1, в) обмотки 2 намотаны на магнитопровод 1 равномерно по всей окружности.

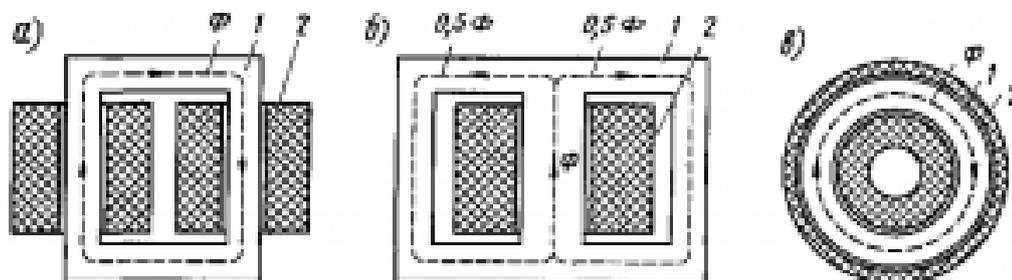


Рис. 1. Устройство стержневого (а), броневое (б) и тороидального (в) трансформаторов

Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Их конструкция более простая и позволяет легче осуществлять изоляцию и ремонт обмоток. Достоинством их являются также лучшие условия охлаждения, поэтому они требуют меньшего расхода обмоточных проводов. Однофазные трансформаторы малой мощности чаще всего выполняют броневыми и тороидальными, так как они имеют меньшую массу и стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения процесса сборки и изготовления. Тяговые трансформаторы с регулированием напряжения на стороне низшего напряжения — стержневого типа, а с регулированием на стороне высшего напряжения — броневое типа.

Магнитопроводы *трансформаторов* (рис. 2) для уменьшения потерь от вихревых токов собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм.

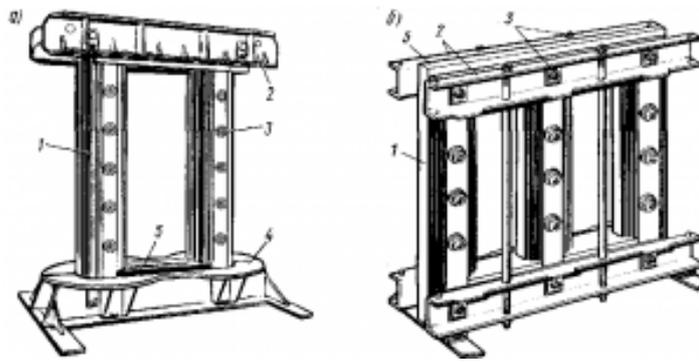


Рис. 2. Магнитопроводы однофазного тягового (а) и силового трехфазного (б) трансформаторов: 1 — стержень; 2 — ярмовые балки; 3 — стяжные шпильки; 4 — основание для установки катушек; 5 — ярмо

Обычно применяют горячекатаную сталь с высоким содержанием кремния или холоднокатаную сталь. Листы изолируют один от другого тонкой бумагой или лаком. Стержни магнитопровода трансформатора средней мощности имеют квадратное или крестовидное сечение, а у более мощных трансформаторов — ступенчатое, по форме приближающееся к кругу (рис. 3, а). При такой форме обеспечивается минимальный периметр стержня при заданной площади поперечного сечения, что позволяет уменьшить длину витков обмоток, а следовательно, и расход обмоточных проводов. В мощных трансформаторах между отдельными стальными пакетами из которых собираются стержни, устраивают каналы шириной 5—6 мм для циркуляции охлаждающего масла. Ярмо, соединяющее стержни, имеет обычно прямоугольное сечение, площадь которого на 10—15% больше площади сечения стержней. Это уменьшает нагрев стали и потери мощности в ней.

В силовых трансформаторах магнитопровод собирают из прямоугольных листов. *Сочленение стержней и ярма обычно выполняют с взаимным перекрытием их листов внахлестку.* Для этого листы в двух смежных слоях сердечника располагают, как показано на рис. 3, б, г, т. е. листы стержней 1, 3 и ярма 2, 4 каждого последующего слоя перекрывают стык в соответствующих листах предыдущего слоя, существенно уменьшая

магнитное сопротивление в месте сочленения. Окончательную сборку магнитопровода осуществляют после установки катушек на стержни (рис. 3, в).

В трансформаторах малой мощности магнитопроводы собирают из штампованных листов П- и Ш-образной формы или из штампованных колец (рис. 4, а—в).

Большое распространение получили также магнитопроводы (рис. 216,г—ж), навитые из узкой ленты электротехнической стали (обычно из холоднокатаной стали) или из специальных железо-никелевых сплавов.

Обмотки. Первичную и вторичную обмотки для лучшей магнитной связи располагают как можно ближе друг к другу: на каждом стержне 1 магнитопровода размещают либо обе обмотки 2 и 3

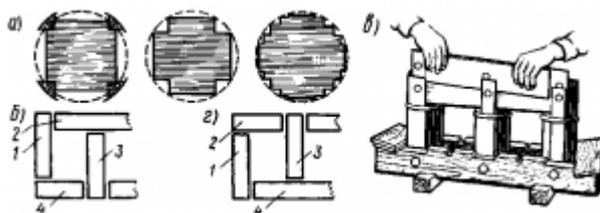


Рис.3 Формы поперечного сечения (а) и последовательность сборки магнитопровода (б — г)



Рис.4.Сердечники однофазных трансформаторов малой мощности, собранные из штампованных листов (а,б), колец (в) и стальной ленты (г-ж)

концентрически одну поверх другой (рис.5,а), либо обмотки 2 и 3 выполняют в виде чередующихся дисковых секций — катушек (рис. 5,б). В первом случае обмотки называют *концентрическими*, во втором — *чередующимися*, или *дисковыми*. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням обычно располагают обмотку низшего напряжения, требующую меньшей изоляции

относительно магнитопровода трансформатора, снаружи — обмотку высшего напряжения.

В трансформаторах броневых типа иногда применяют дисковые обмотки. По краям стержня устанавливают катушки, принадлежащие обмотке низшего напряжения. Отдельные катушки соединяют последовательно или параллельно. В трансформаторах э. п. с, у которых вторичная обмотка имеет ряд выводов для изменения напряжения, подаваемого к тяговым двигателям, на каждом стержне располагают по три концентрических обмотки (рис.5, в). Ближе к стержню размещают нерегулируемую часть 4 вторичной обмотки, в середине — первичную обмотку 5 высшего напряжения и поверх нее — регулируемую часть 6 вторичной обмотки. Размещение регулируемой части этой обмотки снаружи упрощает выполнение выводов от отдельных ее витков.

В трансформаторах малой мощности используют *многослойные* обмотки из провода круглого сечения с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией, который наматывают на каркас из электрокартона; между слоями проводов прокладывают изоляцию из специальной бумаги или ткани, пропитанной лаком.

В мощных трансформаторах, устанавливаемых на э. п. с, тяговых подстанциях и пр., применяют *непрерывные спиральные*

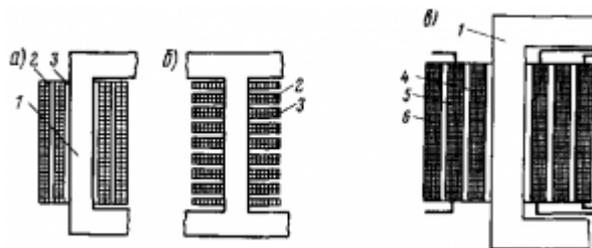


Рис. 5. Расположение концентрических (а), дисковых (б) и концентрических трехслойных (в) обмоток трансформатора

(рис.6, а) и *винтовые параллельные* (рис.6,б) обмотки, обладающие высокой механической прочностью и надежностью. Непрерывную спиральную обмотку используют в качестве первичной (высшего

напряжения) и регулируемой части вторичной обмотки (низшего напряжения). Эта обмотка состоит из ряда последовательно соединенных плоских катушек, имеющих одинаковые размеры. Катушки расположены друг над другом. Между ними устанавливают прокладки и рейки из электрокартона, которые образуют горизонтальные и вертикальные каналы для прохода охлаждающей жидкости (масла).

Для повышения электрической прочности при воздействии атмосферных напряжений две первые и две последние катушки первичной (высоковольтной) обмотки обычно выполняют с усиленной изоляцией. Усиление изоляции ухудшает охлаждение, поэтому площадь сечения проводов этих катушек берут большей, чем для остальных катушек первичной обмотки.

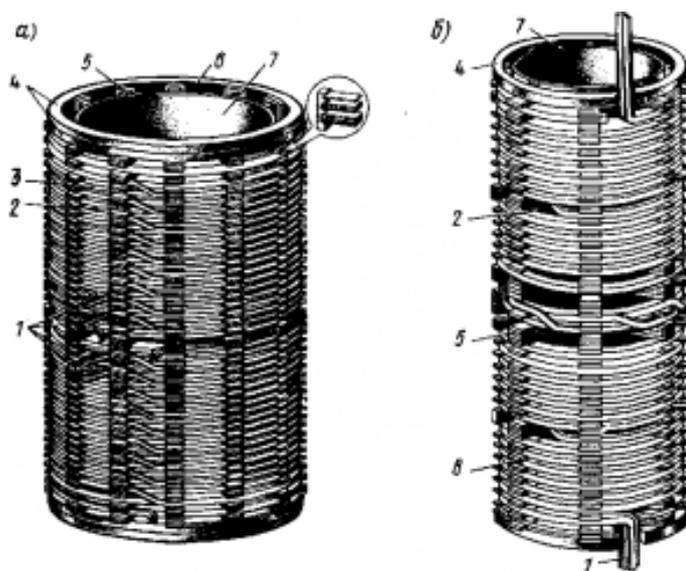


Рис. 6. Непрерывная спиральная (а) и винтовая (б) обмотки мощных трансформаторов электрического подвижного состава: 1 — выводы; 2,6 — каналы для прохода охлаждающей жидкости; 3 — катушки; 4 — опорные кольца; 5 — рейки; 7 — бакелитовый цилиндр; 8 — проводники обмотки

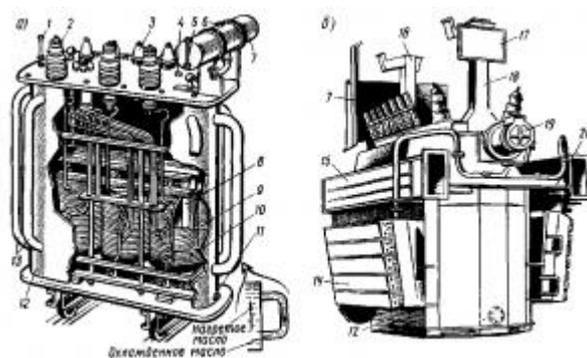


Рис. 7. Устройство трансформаторов общего назначения (а) и тягового (б) с масляным охлаждением: 1— термометр; 2 — выходы обмотки высшего напряжения; 3—выводы обмотки низшего напряжения; 4, 6 — пробки для заливки масла; 5 — масломерное стекло; 7 — расширитель; 8 — сердечник; 9, 10 — обмотки высшего и низшего напряжений; 11 — пробка для спуска масла; 12 —бак для охлаждения масла; 13 — трубы для охлаждения масла; 14 — теплообменник; 15 — воздухопроводы; 16, 18 — стойки для установки переключателя выводов трансформатора; 17 — заводской щиток; 19 — насос для циркуляции масла; 20 — опорные балки

Винтовую параллельную обмотку используют в качестве нерегулируемой части вторичной обмотки. Ее витки наматывают по винтовой линии в осевом направлении подобно резьбе винта. Обмотку выполняют из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, прилегающих друг к другу в радиальном направлении. Между отдельными витками и группами проводов располагают каналы для прохода охлаждающей жидкости.

Число параллельных проводов определяется током, проходящим по обмотке.

1.3. Принцип работы трансформатора

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к сети переменного тока по ней потечёт ток i_0 , который создаст в магнитопроводе переменный

магнитный поток Φ . Магнитный поток Φ наведёт во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции:

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

При холостом ходе $u_2 = e_2$.

Действующее значение ЭДС во вторичной обмотке

$$E_2 = 4,44fw_2\Phi.$$

Подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, можно при заданном напряжении U_1 получить требуемое $U_2 = E_2$. При $U_1 > U_2$ трансформатор понижающий, при $U_1 < U_2$ – трансформатор повышающий. Если вторичную обмотку нагрузить током i_2 , то МДС со стороны вторичной обмотки, согласно закону Ленца, будет стремиться изменить магнитный поток Φ . Однако в действительности этого не произойдёт, т.к. одновременно увеличится ток i_1 в первичной обмотке, который и компенсирует размагничивающее действие i_2 и поддержит магнитный поток Φ const. При замкнутом магнитопроводе ток i_0 составляет 0,5 (3 %) номинального тока первичной обмотки, что позволяет, рассматривая режим работы под нагрузкой, принимать $i_0 = 0$.

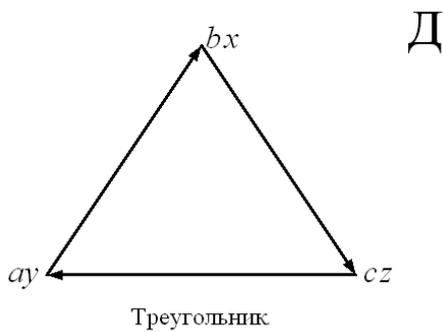
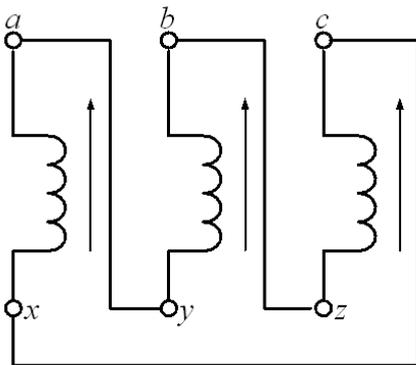
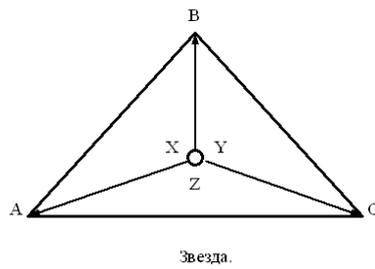
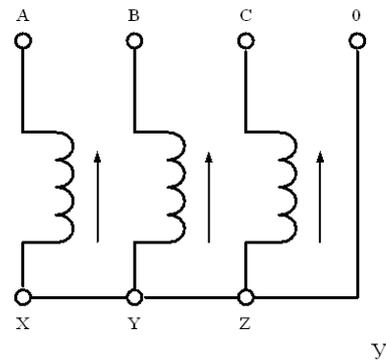
1.4. Обозначения, схемы и группы соединения обмоток трансформатора

Для силовых трансформаторов согласно ГОСТ 11677-85 установлены стандартные обозначения (маркировка) начал и концов (выводов) обмоток и их ответвлений (отводов). В однофазном трансформаторе начало и конец обмотки ВН обозначают соответственно прописными латинскими буквами А и Х, а начало и конец обмотки НН – строчными латинскими буквами *a* и *x*. При наличии третьей обмотки с промежуточным (средним) напряжением начало и конец её обозначают соответственно A_m , X_m . В трёхфазном трансформаторе начала и концы

обмоток ВН обозначают соответственно А, В, С и X, Y, Z; начала и концы обмоток СН – A_m, B_m, C_m и X_m, Y_m, Z_m ; начала и концы обмоток НН – a, b, c и x, y, z . При этом чередование фаз А, В, С принято считать слева направо, если смотреть на трансформатор со стороны отводов ВН. Если обмотка ВН или НН имеет регулировочные ответвления, то их обозначают теми же буквами, что и начало и конец обмотки, но с цифровыми индексами 1, 2, 3 и т.д.

В трёхфазных трансформаторах обмотки могут быть соединены по схемам звезда, треугольник или зигзаг, которые соответственно обозначаются буквами У, Д и Z. При выводе от нейтрали у схемы звезда или зигзаг отвода (ответвления) его обозначают: О – на высшем и низшем, O_m – среднем напряжении. При этом к буквенным обозначениям схем соединения обмоток добавляют индекс " н " (Y_H, Z_H). При соединении в Z обмотку разделяют на части, концы которых обозначают буквой со штрихом (A, a, B, b, C, c). Схемы соединения обмоток трёхфазного трансформатора обозначают в виде дроби, в числителе которой ставят обозначения схемы соединения обмотки ВН, а в знаменателе – обмотки НН (D/Y_H). При наличии третьей обмотки СН обозначение схем соединения обмоток трансформатора будет иметь вид $D/Y/Y_H$, т.е. обозначение обмотки СН располагают между ВН и НН. В практике эксплуатации трансформаторов кроме указанных схем соединения необходимо знать взаимное направление ЭДС в обмотках. Группа соединения обмоток трансформатора характеризуется угловым смещением векторов линейных ЭДС обмотки НН (в трёхобмоточном трансформаторе также СН) по отношению к векторам линейных ЭДС обмотки ВН. Группа обозначается числом, которое следует умножить на 30^0 (угловое смещение, принятое за единицу) для получения угла смещения в градусах. Угол смещения всегда отсчитывается от вектора линейной ЭДС ВН по часовой стрелке до одноимённого вектора ЭДС НН (или СГ). Из всех возможных групп соединений для трёхфазных двухобмоточных трансформаторов

нормализованы только две группы: 0 и 11 с выводом в случае необходимости нулевой точки. Однофазные трансформаторы изготавливаются только нулевой группы.



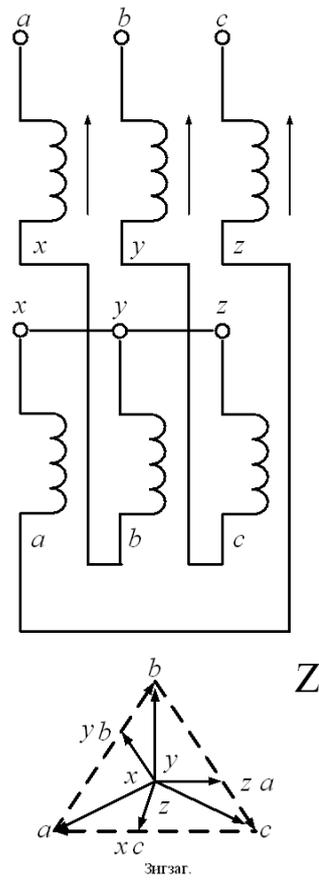


Рис.8. Схемы соединения обмоток трансформатора

Глава 2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ И ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА МОЩНОСТЬЮ 5600 кВА

2.1. Расчёт основных электрических величин и изоляционных расстояний

Расчёт проводим для трёхфазного трансформатора стержневого типа с концентрическими обмотками. Мощность одной фазы и одного стержня:

$$S_{\phi} = S' = S_n/3 = 5600/3 = 1866,7 \text{ кВА.}$$

Номинальные (линейные) токи на сторонах:

$$\text{ВН: } I_2 = \frac{S_n}{U_{н2} \times \sqrt{3}} = \frac{5600 \times 10^3}{35000 \times \sqrt{3}} = 92,4 \text{ А.}$$

$$\text{НН: } I_1 = \frac{S_n}{U_{н1} \times \sqrt{3}} = \frac{5600 \times 10^3}{6000 \times \sqrt{3}} = 538,9 \text{ А.}$$

Фазные токи обмоток:

При соединении обмоток в звезду

$$\text{ВН: } I_{\phi 1} = I_1 = 538,9 \text{ А}$$

При соединении обмоток в треугольник

$$\text{НН: } I_{\phi 2} = I_2/\sqrt{3} = 92,4/\sqrt{3} = 53,3 \text{ А.}$$

Фазные напряжения обмоток:

При соединении обмоток в звезду

$$\text{ВН: } U_{\phi 2} = U_{н2}/\sqrt{3} = 35000/\sqrt{3} = 20207 \text{ В.}$$

При соединении обмоток в треугольник

$$\text{НН: } U_{\phi 1} = U_{н1} = 6000 \text{ В.}$$

Испытательные напряжения обмоток находим по табл. 4.1 [1]

$$\text{ВН: } U_{исп.2} = 85 \text{ кВ.}$$

$$\text{НН: } U_{исп.1} = 25 \text{ кВ.}$$

По табл.5.8 [1] выбираем тип обмоток:

Обмотка ВН при напряжении 35 кВ и токе 53,3А – непрерывная катушечная медная из прямоугольного провода.

Обмотка НН при напряжении 6000 кВ и токе 538,9 А – винтовая двухходовая медная из прямоугольного провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН $U_{исп.2} = 85$ кВ по табл. 4.5 [1] находим изоляционные расстояния (рис.1):

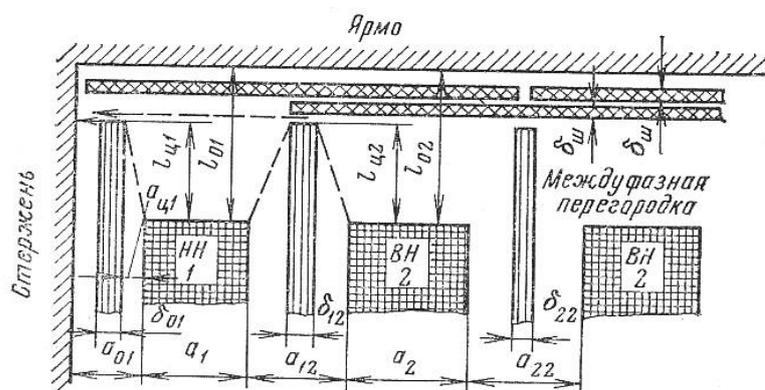


Рис. 2.1. Изоляционные расстояния трансформатора

Для обмотки НН $U_{исп.1} = 25$ кВ по табл.4.4 [1] находим $a_{01} = 17,5$ мм;

2.2. Определение исходных данных расчёта

Мощность обмоток одного стержня:

$$S' = 1866,7 \text{ кВА.}$$

Ширина приведённого канала рассеивания:

$$a_p = a_{12} + \frac{(a_1 + a_2)}{3}$$

$$\frac{(a_1 + a_2)}{3} = \kappa \sqrt[4]{S'} \times 10^{-2} \quad (1)$$

где $\kappa = 0,51$ (из табл. 3.3 [1]),

$$\frac{(a_1 + a_2)}{3} = 0,51 * \sqrt[4]{1866,7} \times 10^{-2} = 0,0335 \text{ м}$$

$$a_p = a_{12} + \frac{(a_1 + a_2)}{3} = 0,027 + 0,0335 = 0,0605 \text{ м}$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$U_a = \frac{P_k}{10S_n} = 55200/10 \times 5600 = 0,9\%.$$

Реактивная составляющая:

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{6,95^2 - 0,9857^2} = 6,88\%.$$

Выбираем трёхфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне по рис.2.2.

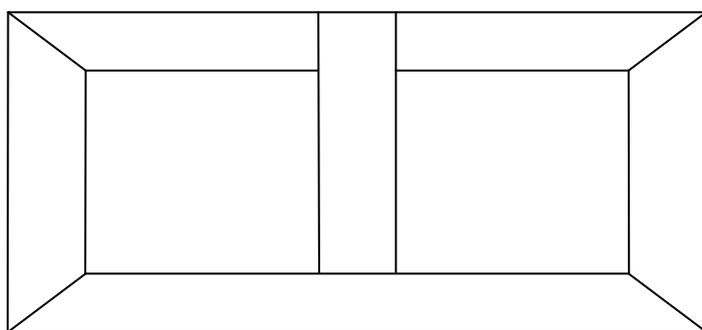


Рис.2.2. Схема плоской магнитной

Прессовка стержней бандажами из стеклоленты и ярм стальными балками. Материал магнитной системы – холоднокатаная электротехническая сталь марки 3405 толщиной 0.30 мм.

Принимаем индукцию в стержне $B_c = 1,6 \text{ Тл}$ в соответствии с рекомендациями табл.2.4 [1].

Диаметр стержня $d=0,32 \text{ м}$ выбираем по табл.2.5 [1] и по этой же таблице выбираем число ступеней и коэффициент $k_{кр}$.

В сечении стержня 9 ступеней, коэффициент заполнения круга $k_{кр} = 0,913$, k_3 – коэффициент заполнения сечения стержня сталью, изоляция пластин – нагревостойкое изоляционное покрытие плюс однократная лакировка, $k_3 = 0,97$, см. табл.2.3 [1].

Коэффициент заполнения площади круга сталью

$$k_{\bar{n}} = k_{\bar{e}\bar{d}} \times k_3 = 0,913 \times 0,97 = 0,886$$

Ярмо многоступенчатое, число ступеней 7, коэффициент усиления ярма

$k_y = 1,02$, для трансформаторов мощностью 25-6300 кВА индукция в ярме:

$$B_y = B_c / k_y = 1,62 / 1,02 = 1,588 \text{ Тл}$$

Число зазоров магнитной системы на косом стыке- 4, на прямом- 3.

Индукция в зазоре на прямом стыке:

$$B_z'' = B_c = 1,62 \text{ Тл}$$

На косом стыке:

$$B_z'' = B_c / \sqrt{2} = 1,146 \text{ Тл}$$

По табл.3.6 [1] находим коэффициент, учитывающий отношение основных потерь в обмотках к потерям короткого замыкания, $k_d = 0,91$ и по табл.3.4 и 3.5 [1] находим постоянные коэффициенты для медных обмоток $a = 1,38$ и $b = 0,25$.

Принимаем коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского) $k_p = 0,95$.

2.3. Расчёт основных коэффициентов

$$A = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S'_p k_p}{f U_p B_c^2 k_c^2}} = 0,316$$

$$d = Ax \Rightarrow x = d/A = 0,34/0,316 = 1,076$$

Величина β определяет соотношение между диаметром и высотой обмотки.

Величина β равна отношению средней длины окружности канала между

обмотками πd_{12} к высоте обмотки l : $\beta = \frac{\pi d_{12}}{l}$

Значение β может варьироваться в широких пределах и практически изменяется в масляных и сухих трансформаторах существующих серий в пределах от 1 до 3,6. Рекомендуется $\beta = 1,8 \div 2,4$

$$\beta = x^4 = 1,076^4 = 1,34 - \text{принадлежит диапазону } 1,8 \leq \beta \leq 2,4$$

2.4. Определение основных размеров

Диаметр стержня:

$$d = Ax = 0,258 \cdot 1,24 = 0,32 \text{ м.}$$

Активное сечение стержня:

$$P_c = 0,785 k_c A^2 x^2 = 0,08285 \text{ м}^2.$$

Средний диаметр обмоток:

$$d_{12} = aAx = 0,476 \text{ м.}$$

Высота обмоток:

$$l = \pi d_{12} / \beta = 1,115 \text{ м.}$$

Высота стержня:

$$l_c = l + 2l_0 = 1,265 \text{ м.}$$

Расстояние между осями стержней:

$$C = d_{12} + a_{12} + bd + a_{22} = 0,6384 \text{ м.}$$

Напряжение одного витка (предварительно):

$$U_B = 4.44 f P_c B_c = 29,8 \text{ В.}$$

Полученное значение U_p не должно отличаться от заданного значения более чем на 10%.

2.5. Расчет обмотки НН

Число витков обмотки НН

$$w_1 = \frac{U_{\delta 1}}{U_B} = \frac{6000}{29,8} = 202$$

Принимаем $w_1 = 16$ витков. Напряжение одного витка $U_B = 6000/202 = 29,7 \text{ В.}$

Средняя плотность тока в обмотках :

$$J_{cp} = 0,746 \cdot k_{\delta} \frac{P_{\kappa} U_B}{S d_{12}} \cdot 10^4 = 4,1 \text{ MA/m}^2$$

Для обмотки из медного провода

$$J_{\bar{n}\delta} = 0,507 \cdot k_{\bar{a}} \frac{D_e U_{\hat{A}}}{S d_{12}} \cdot 10^4$$

Сечение витка ориентировочно

$$P'_e \approx I_{\phi 1} / J_{cp} = 129 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2.$$

По табл. 5.2 [1] по мощности 5600 кВ·А, току на один стержень 2083 А, номинальному напряжению обмотки 400 В и сечению витка 609 мм² выбираем конструкцию винтовой обмотки. Размер радиального канала предварительно $h_k = 5$ мм. Число реек по окружности обмотки 12, ширина междувитковых прокладок $b_{np} = 40$ мм.

Если мощность трансформатора $S < 630$ кВА и $I_{\phi 1} < 800$ А, то рекомендуется для обмотки НН применять цилиндрическую обмотку. Ориентировочно осевой размер витка:

$$h_{e1} = l / (w_1 + 4) - h_k = 0,587 / (16 + 4) - 0,005 = 0,02435 \text{ м} = 24,35 \text{ мм}.$$

Ввиду того, что $h_{e1} > 15$ мм и по графикам (рис.10) при максимальном размере медного провода $h = 15$ мм и плотности тока $J = 3,50$ МА/м² плотность теплового потока $q = 2000$ Вт/м², что при естественном масляном охлаждении не допускается, выбираем двухходовую винтовую обмотку с радиальными каналами в витках и между витками с равномерно распределенной транспозицией. Медный провод прямоугольного сечения марки ПБ, используемый в силовых трансформаторах, имеет размеры поперечного сечения проволоки – меньший от 1,4 до 5,6 и больший от 3,75 до 16 мм при площади сечения от 5,04 до 83,1 мм² и толщине изоляции от 0,45 до 1,92 мм. Если $h_{e1} < 15$ мм, то обмотка одноходовая.

По полученным ориентировочным значениям P'_e и h_{e1} по табл.5.8 подбираем сечение витка из 10 параллельных проводов, сечение провода $P_{эл} = 61,9$ мм², разделенных на две группы по пять проводов с каналами по 5 мм между группами витка и между витками. Подобранные размеры проводов записываются так:

$$\text{Число параллельных проводов} \times \frac{\text{Размеры провода без изоляции}}{\text{Размеры провода с изоляцией}}$$

$$ПБ n_{эл} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} = ПБ 2 \times \frac{5 \times 13,2}{5,5 \times 13,7}$$

Для частичной компенсации разрыва в обмотке ВН при регулировании напряжения размещаем в середине высоты обмотки НН шесть радиальных каналов по 10 мм.

Полное сечение витка:

$$П_1 = П_{эл} \cdot n_{эл} = 2 \cdot 65,1 = 130,2 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока:

$$J_1 = \frac{I_{\delta 1}}{P_1} = \frac{538,9 \cdot 10^6}{130,2} = 4,1 \text{ МА/мм}^2.$$

По графикам рис.5.34,б [1] . находим для $J=3,365 \text{ МА/мм}^2$ и $b=11,2 \text{ мм}$ $q \approx 1300 \text{ Вт/мм}^2$.

$$a_1 = n_{эл}/2 \cdot a' = (5,5 \cdot 3 + 2 \cdot 2 \cdot 0,12 + 3) \cdot 10^{-3} = 0,02 \text{ м}.$$

Если обмотка одноходовая, то $a_1 = n_{эл} \cdot a'$.

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = d + 2a_{01} = 0,59 \text{ м}.$$

Внешний диаметр обмотки

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1 = 0,63 \text{ м}.$$

Средний диаметр обмотки

$$D_{cp1} = (D'_1 + D''_1)/2 = 0,61 \text{ м}.$$

Масса металла медной обмотки

$$G_{o1} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{cp1} \cdot w_1 \cdot П_1 = 962 \text{ кг},$$

где c - число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора.

Для алюминиевого провода $G=8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{cp1} \cdot w_1 \cdot П_1$. Для определения массы изолированного провода обычно увеличивают массу металла обмотки в соответствии с табл.5.5 [1].

Масса провода по табл.5.5 [1].

$$G_{np1} = k \cdot G_{o1} = 981 \text{ кг}.$$

2.6. Расчет обмотки ВН

Выбираем схему регулирования по рис.2.3 с выводом концов всех трех фаз обмотки к одному трехфазному переключателю. Контакты переключателя рассчитываются на рабочий ток $I_2=92,4$ А.

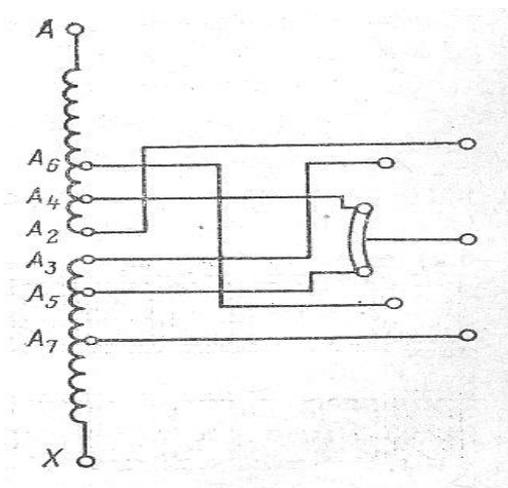


Рис.2.3. Схема регулирования

Для получения на стороне ВН различных напряжений необходимо соединить:

Напряжение, В		Ответвления обмотки
$U_{н2} + 5\% U_{н2}$	1 0500	A ₂ A ₃ B ₂ B ₃ C ₂ C ₃
$U_{н2} + 2,5\% U_{н2}$	1 0250	A ₃ A ₄ B ₃ B ₄ C ₃ C ₄
$U_{н2}$	1 0000	A ₄ A ₅ B ₄ B ₅ C ₄ C ₅
$U_{н2} - 2,5\% U_{н2}$	9 750	A ₅ A ₆ B ₅ B ₆ C ₅ C ₆
$U_{н2} - 5\% U_{н2}$	9 500	A ₆ A ₇ B ₆ B ₇ C ₆ C ₇

Число витков в обмотке ВН при номинальном напряжении:

$$W_{н2} = \frac{U_{\phi 2}}{U_B} = w_1 \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} = 680 \text{ виток.}$$

Число витков на одной ступени регулирования:

$$W_P = \frac{0,025 \cdot U_{н2}}{\sqrt{3} \cdot U_B} = 17 \text{ витков}$$

Для пяти ступеней

Напряжен ие, В	Число ответвлений	витков на
36750	680+2· 17=714	- W ₂
	max	
35875	680+17=697	
35000	680	- W _{н2}
34125	680-17=663	
33250	680-2· 17=646	

Ориентировочная плотность тока

$$J'_2 = 2J_{cp} - J_1 = 4,1 \text{ MA/M}^2.$$

Ориентировочное сечение витка

$$P'_2 = I_{\phi 2} / J'_2 = 13 \text{ мм}^2.$$

По табл.5.8 [1] выбираем непрерывную катушечную обмотку из медного прямоугольного провода ($S = 5600 \text{ кв}\cdot\text{А}$; $I_2 = 92,4 \text{ А}$; $U_2 = 35000 \text{ В}$).

По сортаменту медного обмоточного провода (табл.5.2 [1]) выбираем провод марки ПБ

$$\text{ПБ} - n_{\text{эл}2} \times \frac{a \cdot b}{a_2' \cdot b_2'} = 1 \times \frac{2,12 \cdot 6,3}{2,62 \cdot 6,8} \text{ сечением } P_2 = 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Радиальный размер $a_2 = a_2' \cdot w_{\text{кат}} = 0,016 \text{ м}$.

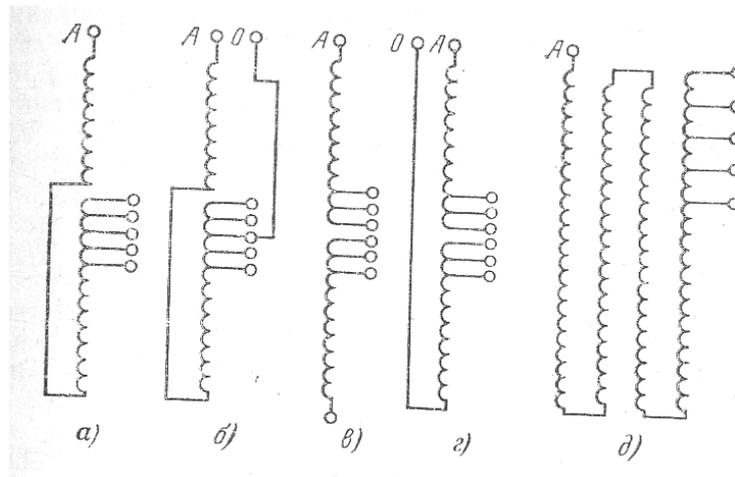


Рис.2.4. Возможные схемы регулирования напряжения обмотки ВН

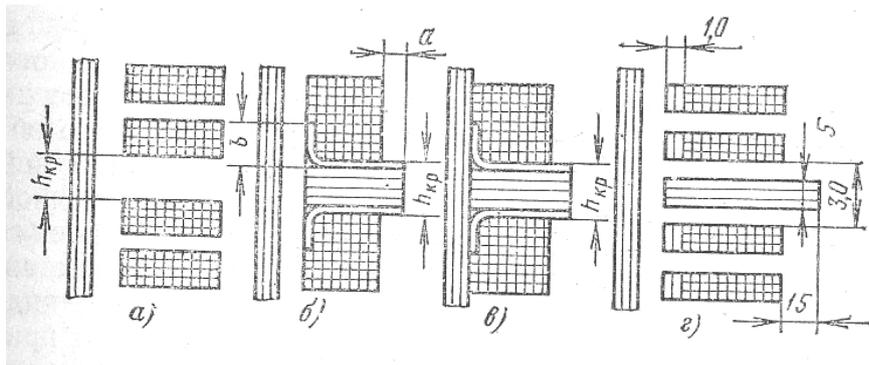


Рис.2.5. Конструкция изоляции в месте разрыва обмотки ВН

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов приняты по рис.2.6.

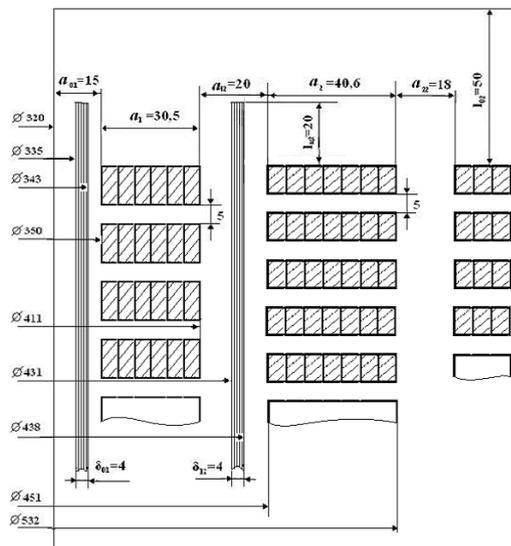


Рис.2.6. Основные размеры обмоток

Принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра, на котором на 12 рейках наматывается обмотка ВН.

$$\varnothing \frac{D_1'' + a_{12}}{D_1'' + a_{12} + 2\delta_{12}} \times (l + 2l_{y2}) = \varnothing \frac{0,431}{0,438} 0,62 \text{ м.}$$

Внутренний диаметр обмотки ВН

$$D'_2 = D''_1 + 2a_{12} = 0,59 \text{ м.}$$

Внешний диаметр обмотки

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2 = 0,451 + 2 \cdot 0,0406 = 0,532 \text{ м.}$$

Средний диаметр обмотки

$$D_{cp2} = (D'_2 + D''_2) / 2 = 0,56 \text{ м.}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки для катушки ВН

$$q_2 = \frac{107 J_2 \cdot 10^6 I_{\phi 2} W_k k_D}{k_3 (b'_2 + a_2)} \cdot 10^{-10} =$$
$$= \frac{107 \cdot 3,48 \cdot 10^6 \cdot 144,3 \cdot 7 \cdot 1,05}{0,8(0,0085 + 0,0406)} \cdot 10^{-10} = 1005,4 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Если обмотка из алюминиевого провода, то

$$q_2 = \frac{172 J_2 \cdot 10^6 I_{\phi 2} W_k k_D}{k_3 (b'_2 + a_2)} \cdot 10^{-10}.$$

Масса металла обмотки ВН

$$G_{02} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{cp2} \cdot \Pi_2 W_{2max} = 474,5 \text{ кг}.$$

Если обмотка из алюминиевого провода, то

$$G_{02} = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{cp2} \cdot \Pi_2 W_{2max}.$$

Масса провода в обмотке ВН с изоляцией

$$G_{np2} = G_{02} \cdot 1,015 = 484 \text{ кг}.$$

Масса металла (меди) двух обмоток

$$G_0 = G_{01} + G_{02} = 1436,5 \text{ кг}.$$

Масса провода двух обмоток

$$G_{np} = G_{np1} + G_{np2} = 1465 \text{ кг}.$$

2.7. Расчет эксплуатационных характеристик силового трансформатора мощностью 5600 кВА, напряжением 35/6 кВ для подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат»

Построение зависимости $\Delta U=f(\cos\varphi_2)$

$$\Delta U = U_{кз.а} \cos\varphi_2 + U_{кз.р} \sin\varphi_2 + (U_{кз.р.а} \cos\varphi_2 - U_{кз.а} \sin\varphi_2)^2 / 200$$

$\cos\varphi_2$	$\sin\varphi_2$	$U_{кз.а} \times \cos\varphi_2$	$U_{кз.р} \times \sin\varphi_2$	$U_{кз.р.а} \times \cos\varphi_2$	$U_{кз.а} \times \sin\varphi_2$	$U_{кз.а} \cos\varphi_2 + U_{кз.р} \sin\varphi_2$	$(U_{кз.р.а} \cos\varphi_2 - U_{кз.а} \sin\varphi_2)^2 / 200$	$\Delta U\%$
0	1	0	6,88	0	0,9857	6,88	0,0049	6,9
0,2	0,98	0,197	6,74	1,376	0,966	6,937	0,0008	7,0
0,4	0,92	0,394	6,3	2,75	0,907	6,694	0,017	6,71
0,6	0,8	0,591	5,5	4,13	0,789	6,091	0,0558	6,1
0,8	0,6	0,789	4,13	5,5	0,59	4,919	0,121	5,01
1	0	0,9857	0	6,88	0	0,9857	0,237	0,99
0,8	-0,6	0,789	-4,13	5,5	-0,59	-3,341	0,185	-3,22
0,6	-0,8	0,591	-5,5	4,13	-0,789	-4,909	0,121	-4,62
0,4	-0,92	0,394	-6,3	2,75	-0,907	-5,906	0,067	-5,68
0,2	0,98	0,197	-6,74	1,376	-0,966	-6,543	0,027	-6,3
0	-1	0	-6,88	0	-0,9857	-6,88	0,0049	

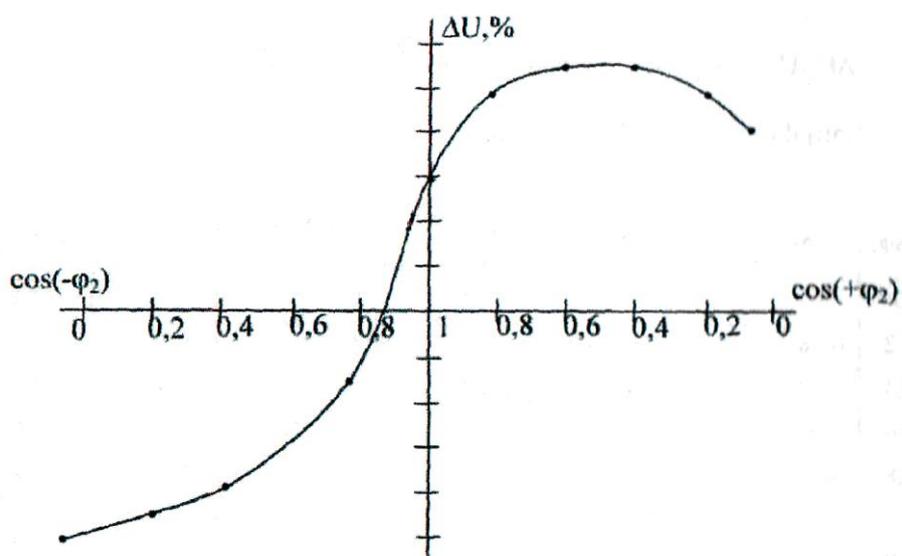


Рис.2.7. Зависимость $\Delta U=f(\cos\varphi_2)$

Построение зависимости $U_2, \Delta U=f(K_H)$

K_H	1/4	1/2	3/4	1/1	5/4
$\cos\varphi_2 = 1$					
$U_{к.з.р.а} \cos\varphi_2\%$	0,246	0,493	0,739	0,9857	1,23
$U_{к.з.р} \sin\varphi_2 \%$	0	0	0	0	0
$\Delta U\%$	0,246	0,493	0,739	0,9857	1,23
$U_2\%$	99,75	99,5	99,26	99	98,77
$\cos\varphi_2 = 0,7$					
$U_{к.з.р.а} \cos\varphi_2\%$	0,172	0,345	0,517	0,69	0,86
$U_{к.з.р} \sin\varphi_2 \%$	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5
$\Delta U\%$	0,872	1,745	2,617	3,49	4,36
$U_2\%$	99	98,2	97,4	96,5	95,6

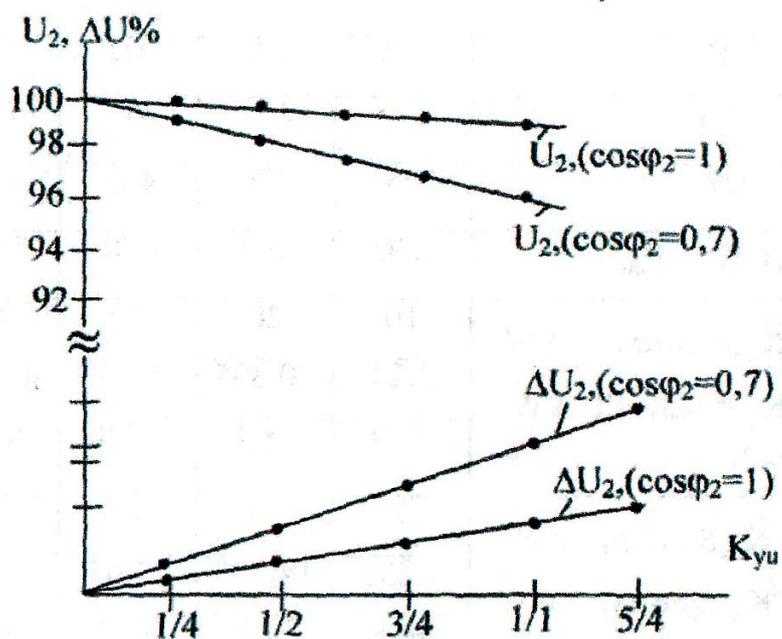


Рис.2.8. Зависимость $U_2, \Delta U=f(K_H)$

Построение зависимости $\eta = f(K_H)$

$$\eta = (K_H \cos\varphi_2 S_H) / (K_H \cos\varphi_2 S_H + P_0 + K_H^2 P_{K3})$$

K_H	1/4	1/2	3/4	1/1	5/4
P_0 Вт	16300	16300	16300	16300	16300
$K_H^2 P_{K3}$, Вт	3450	13800	31050	55200	86250
$\Sigma P = P_0 + K_H^2 P_{K3}$, Вт	19750	30100	47350	71500	102550
$\cos\varphi_2 = 1$					
$K_H \cos\varphi_2 S_H$ кВт	1400	2800	4200	5600	7000
$K_H \cos\varphi_2 + \Sigma P$ Вт	1419,75	2830,1	4247,35	5671,5	7102,55
η	0,986	0,989	0,9889	0,987	0,986
$\cos\varphi_2 = 0,7$					
$K_H \cos\varphi_2 S_H$ кВт	980	1960	2940	3920	4900
$K_H \cos\varphi_2 + \Sigma P$ Вт	999,75	1990,1	2987,35	3991,5	5002,55
η	0,98	0,985	0,984	0,982	0,979

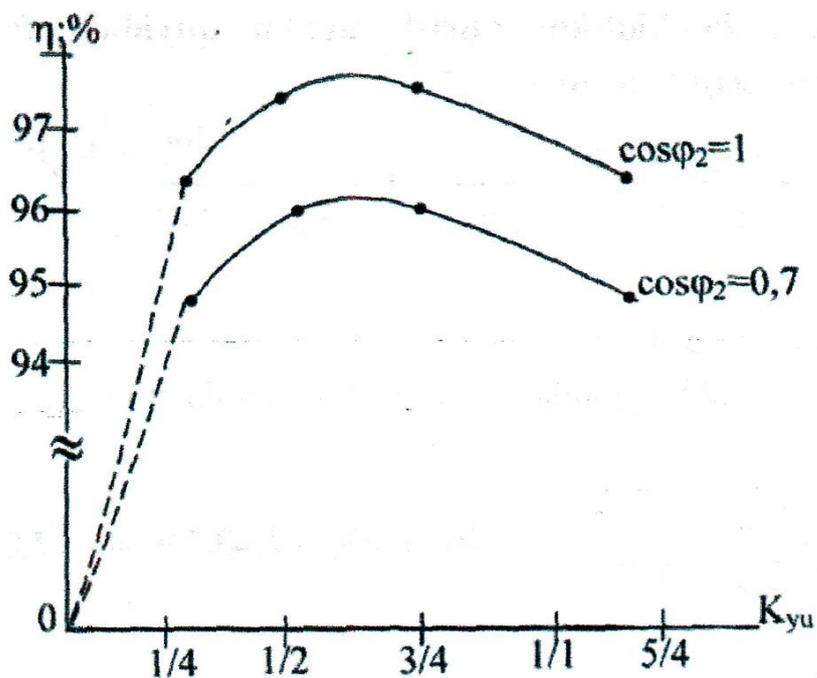


Рис.2.9. Зависимость $\eta = f(K_H)$

Выводы

1. Проведен полный расчет силового трехфазного трансформатора мощностью 5600 кВА для подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат».

2. Проведен расчет эксплуатационных характеристик силового трехфазного трансформатора мощностью 5600 кВА для подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат».

Заключение

1. Проведен полный расчет силового трехфазного трансформатора мощностью 5600 кВА для подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат».

2. Расчеты показывают, что потери холостого хода и короткого замыкания находятся в пределах указанных по ГОСТ.

3. Проведен расчет эксплуатационных характеристик силового трехфазного трансформатора мощностью 5600 кВА для подстанции «Металлург» ОАО «Узметкомбинат».

4. Превышение температуры масла в верхних слоях $\theta_{мвс} < 60^{\circ}\text{C}$ и обмоток $\theta_{об} < 65^{\circ}\text{C}$ лежат в пределах допустимого нагрева по ГОСТ 11677-85.

Использованная литература

1. **П.М. Тихомиров.** Расчёт трансформаторов. М., Энергоиздат, 1986, 528 с.
2. **Гончарук А.И.** Расчёт и конструирование трансформаторов. М., Энергоиздат, 1990, 256с.
3. **Сапожников А.В.** Конструирование трансформаторов. Г. Л., 1959.
4. **Трансформаторы силовые и измерительные.** Справочник. Том 1. Трансформаторы силовые. – М.; ООО Ай Би Тех, 2004.
5. **Трансформаторы силовые и измерительные.** Справочник. Том 2. Трансформаторы силовые. – М.; ООО Ай Би Тех, 2004.
6. **Трансформаторы силовые и измерительные.** Справочник. Том 3. Трансформаторы силовые. – М.; ООО Ай Би Тех, 2004.
7. <http://www.referats.net/online/referat.php?id=rkr-1-4405&show=>
8. <http://www.electroinfo.ru/magazine/?id=162&nid=3>
9. <http://www.tesc.ru>
10. **Салимов Д.С., Пирматов Н.Б., Бекжанов Б.Э.** Трансформаторы и автотрансформаторы. -Т.: Вектор Пресс, 2009.
11. **Акимов Е.Г., Манукин М.М.** Трансформаторы силовые и измерительные. Справочник. Том 3. Трансформаторы силовые. – ООО Ай Би Тех. 2004, стр. 304.
12. **Долин А.П., Крайнов В.К., Смекалов В.В., Шамко В.Н.** Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов/ Энергетика, 2001. №7.
13. **Алексеев Б.А.** Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: НЦ «ЭНАС», 2002.
14. <http://www.trans-eco.ru/catalog/01/index.htm>. (Трансформаторы и автотрансформаторы)

- 15. Иванов–Смоленский А.В.** Электрические машины. В 2-х Т. Том1. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.
- 16. <http://electron9.narod.ru/vp/BO15/008.htm>.** Расчет трансформаторов.
- 17. Копылов И.П.** Электрические машины.-М.: Высшая школа, 2001.
- 18. Акимов Е.Г., Манукин М.М.** Трансформаторы силовые и измерительные. Справочник. Том 2. Трансформаторы силовые. – ООО Ай Би Тех. 2004, стр. 304.
- 19. Гольдберг О.Д., Хлемская С.П.** Электромеханика.-М.: Изд-во «Академия», 2007.
- 20. Набиев Ф.М.** Электрические машины.-М.: Изд-во «РадиоСофт», 2008.
- 21. Долин А.П., Крайнов В.К., Смекалов В.В., Шамков В.Н.** Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов– Энергетик, 2001, №7.
- 22. Лизунов С.Д., Лоханин А.К.** Проблема современного трансформаторостроения в России – Электричество, 2000, №8.
- 23. Раскулов Р.Ф.** О превышении мощности вторичной нагрузки для для трансформаторов тока классов точности 0,2S и 0,5S –Электрические станции. 2003, №8, стр. 59-62.
- 24. Акимов Е.Г., Манукин М.М.** Трансформаторы силовые и измерительные. Справочник. Том 1. Трансформаторы силовые. – ООО Ай Би Тех. 2004, стр. 384.
- 25. http://troickii-elektromeha.neobroker.ru/list/Silovye_transformatorv\Ohlazhdajushee-ustroistvo-serii-ODC-TU-3418-001-00213374-95.html**
- 26. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И.** Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов.-М.: Издательский центр «Академия», 2003.-176 с.
- 27. Salimov J.S., Pirmatov N.B.** Elektr mashinalari.-Т.: O'qituvchi nashriyoti, 2005. - 240 b.