



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Учебное  
пособие

УМО

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

**А. Л. Встовский, С. А. Встовский, Л. Ф. Силин, Н. Е. Полошков**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Рекомендовано федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 – «Электроэнергетика и электротехника», 30.07.2012 г.

Красноярск  
СФУ  
2013

УДК 621.314.2(07)  
ББК 261.8я73  
П791

**Встовский, А. Л.**

П791      Проектирование трансформаторов / А. Л. Встовский, С. А. Встовский, Л. Ф. Силин, Н. Е. Полошков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 120 с.  
ISBN 978-5-7638-2781-1

Приведены методика учебного проектирования силовых масляных трансформаторов, сведения по конструкции магнитопровода, обмоток ВН и НН, элементов системы охлаждения и справочные данные.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника», а также магистрантов и специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией силовых трансформаторов.

**УДК 621.314.2(07)**  
**ББК 261.8я73**

ISBN 978-5-7638-2781-1

© Сибирский федеральный  
университет, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Большая часть электроэнергии переменного тока вырабатывается на крупных электростанциях с генераторами большой мощности, размещённых вблизи источников топливных и гидравлических энергоресурсов. Выходное напряжение генераторов составляет 6–30 кВ. Более половины электроэнергии потребляется на низком напряжении 0,22–0,66 кВ приёмниками, удалёнными от электростанций на десятки, сотни и тысячи километров.

Передача значительных мощностей на низких напряжениях 0,22–30 кВ практически невозможна, так как велики токи, сечения проводов линий электропередачи и потери мощности в них. Поэтому на большие расстояния электроэнергию передают по линиям высокого напряжения 110–1 150 кВ.

Для повышения напряжения генераторов до напряжения линий и снижения напряжения линий до напряжения потребителей применяют силовые трансформаторы, без которых эффективная передача энергии невозможна.

Обычно в сети происходит 5–7 трансформаций напряжения, и общее число трансформаторов намного превосходит число генераторов. С целью гибкого управления потоками энергии число и суммарная мощность трансформаторов каждой ступени с меньшим напряжением больше, чем предыдущей ступени с большим напряжением. Поэтому суммарная мощность силовых трансформаторов в 8–10 раз больше мощности генераторов, установленных на электростанциях.

По мере уменьшения напряжения единичная мощность трансформаторов снижается, а расход материалов и потери мощности на 1 кВ·А передаваемой мощности возрастают. Большая часть от общего числа всех трансформаторов приходится на последние ступени передачи с напряжением 6–35 кВ. На производство этих трансформаторов тратится основная часть электротехнических материалов, в них же выделяется большая часть потерь мощности.

Вследствие особой роли силовых трансформаторов в процессе передачи энергии к ним предъявляют жесткие технико-экономические требования. Поэтому при проектировании трансформаторов должны применяться соответствующие современному уровню трансформаторостроения новые инженерные решения, позволяющие уменьшить массу, габариты и стоимость изделия.

Экономичность трансформаторов в эксплуатации определяется регламентированными потерями мощности холостого хода и короткого замыкания. Заданные потери мощности можно получить при рациональном соотношении основных размеров трансформатора; грамотном выборе со-

временных магнитных, проводниковых, изоляционных материалов и их удельных нагрузок.

Надежность трансформатора в большой степени определяется работой вспомогательного оборудования – устройств охлаждения, подключения к сети, регулирования напряжения, сигнализации и защиты.

Сложную и трудоёмкую задачу проектирования отдельных трансформаторов или их серий решают крупные специализированные научные, конструкторские и технологические подразделения трансформаторных заводов. При этом используются средства современной вычислительной техники, методы математического и физического моделирования.

Для начинающих специалистов в области эксплуатации, обслуживания и ремонта трансформаторов также необходимы представления об основах инженерного проектирования силовых трансформаторов. Расчёты по упрощённым методикам позволяют уяснить влияние основных размеров, электромагнитных нагрузок, свойств применяемых активных материалов на технические характеристики трансформаторов. Разработка конструкции требует изучения систем охлаждения и очистки масла, приборов сигнализации, защиты и других вспомогательных устройств масляных трансформаторов.

В данном учебном пособии рассмотрены основные вопросы курсового проектирования наиболее распространённых силовых трёхфазных масляных трансформаторов общего назначения I–III габаритов (мощность до 6 300 кВ·А, напряжение до 35 кВ включительно) с плоской магнитной системой и регулированием напряжения с полным отключением трансформатора от сети (переключение без возбуждения – далее ПБВ).

Для расчёта трансформаторов использована в сокращённом и упрощённом виде методика профессора, доктора технических наук П. М. Тихомирова [1], доступная для понимания и обеспечивающая хорошие результаты. При этом подразумевается, что, приступая к проектированию, студенты обладают общими знаниями об устройстве, принципе действия и основных характеристиках и параметрах силовых трансформаторов, полученными в процессе изучения дисциплин «Электрические машины» и «Электромеханика».

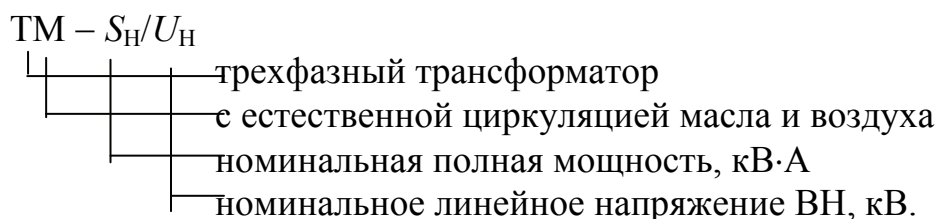
# 1. СОСТАВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА. АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

## 1.1. Состав курсового проекта и общие рекомендации

Проектирование трансформатора включает проработку проектного задания, электромагнитный и тепловой расчеты, разработку конструкции по результатам расчетов.

*Задание на проектирование* содержит номинальные данные проектируемого трансформатора: сведения о соединении обмоток, системе охлаждения, режиме работы (длительная или кратковременная нагрузка) и характере установки (внутренняя или наружная); значения основных параметров; дополнительные данные о материалах активных частей.

Часть этих сведений отражена в обозначении типа проектируемых трансформаторов, они указываются на титульном листе (прил. 1) и имеют следующий вид:



Задание на проект следует составить в соответствии с заданным номером варианта по форме, приведенной в прил. 2.

Студентам дневной формы обучения номер варианта выдает преподаватель. Студенты заочной формы обучения при отсутствии указаний преподавателя выбирают номер варианта по двум последним цифрам учебного шифра.

В соответствии с номером варианта следует выбрать по прил. 3 основные номинальные данные: материал, схемы и группу соединения обмоток; параметры проектируемого трёхфазного трансформатора. Характер установки трансформатора проектировщик выбирает самостоятельно. Материал магнитопровода следует выбрать в соответствии с рекомендациями главы 2.

Курсовой проект состоит из расчетной и графической части.

*Состав расчётно-пояснительной записки:* титульный лист (прил. 1); задание на курсовой проект (прил. 2); график выполнения проекта (прил. 4); оглавление (содержание); содержательная (расчетная) часть; библиографический список.

В содержательной (расчётной) части записки приводятся: окончательный вариант расчётов, содержащий необходимые пояснения, формулы, численные величины; эскизы сечения стержня, магнитопровода, расположения обмоток, схемы отводов в обмотке ВН, элементов системы охлаждения, бака с указанием основных размеров.

Приводимые в записке обоснования принятых решений и пояснения следует формулировать грамотно и излагать кратко.

Расчеты следует выполнять в Международной системе единиц измерения физических величин (СИ). Допустимо использование кратных и дольных единиц от исходных единиц измерения СИ, как это сделано с целью упрощения расчётов в ряде формул данного учебного пособия. В процессе проектирования необходимо внимательно следить за приводимыми в экспликациях формулами и пояснениями к ним, размерностями подставляемых в формулы величин и результатами расчёта.

Расчёты рекомендуется выполнять с помощью компьютерных программ, например, с использованием пакета программ «Mathcad». Алгоритм проектирования представлен в подпункте 1.2.

При конструктивной разработке трансформатора и выполнении графической части проекта следует дополнительно использовать источники [1–6] из библиографического списка.

Графическая часть проекта состоит из трёх листов чертежей формата А1 (594×841 мм).

Лист 1 (прил. 5): остов трансформатора в собранном виде с деталями крепления (ярмовые балки, стяжные шпильки, прессующие бандаж и полубандаж, устройства для подъема и установки активной части) в двух проекциях в масштабе 1:1–1:5 с основными размерами. План сборки магнитопровода и таблица с размерами пакетов стали в сечениях стержня и ярма. Установка обмоток на одном стержне с вертикальным и горизонтальным разрезами в масштабе 1:1–1:2. На чертеже необходимо изобразить конструкцию обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений, их главной и продольной изоляции с основными размерами. Показать в увеличенном масштабе 2:1–5:1 строение витка, катушки или части обмоток ВН и НН. При большой высоте обмотки или магнитопровода сделать разрыв в средней части.

Лист 2 (прил. 6): общий вид трансформатора в масштабе 1:1–1:10 с основными размерами бака, габаритными размерами трансформатора и позиционными номерами составных частей. Таблицу обозначений и наименований составных частей можно включить в расчетно-пояснительную записку. На фронтальной и боковой проекциях начертить бак без передней и боковой стенок, детально показать внутреннее устройство: установку магнитопровода с обмотками, крепление отводов; установку вводов ВН и НН, расширителя, переключателя ответвлений обмотки ВН и другой арма-

туры. На виде сверху показать установку вспомогательного оборудования и устройств охлаждения.

Лист 3 (прил. 7): вводы ВН и НН; схема обмотки ВН с регулировочными ответвлениями для регулирования напряжения.

При оформлении проекта руководствоваться требованиями ЕСКД и стандарта организации СТО 4.2–07–2010 [2].

## **1.2. Применение программы Mathcad при проектировании трансформаторов и алгоритм выполнения курсового проекта**

Mathcad – это программный продукт фирмы Mathsoft. Первая версия этой программы была выпущена в 1994 г. Создатели программы последовательно, начиная с первой версии, придерживались принципа What You See Is What You Get (Что вы видите, то и вы и получите). Высокая степень интеграции Mathcad с другими Windows-приложениями позволяет использовать её при *проектировании трансформаторов не только как обычный калькулятор*.

Путём сохранения документов в виде HTML-файлов можно выставить результаты решения в Интернет, а при сохранении результатов проектирования в качестве Word-документов существенно упрощается оформление расчётно-пояснительной записки. Кроме этого, отличная совместимость Mathcad и Excel позволяет произвести сравнительный качественный и количественный анализ различных вариантов спроектированных трансформаторов заданного типоразмера и выбрать оптимальный.

Mathcad – система «программирования без программирования». Это позволяет при помощи специального простого и изящного языка программирования создать вычислительный алгоритм, математическую модель силового масляного трансформатора и провести курсовое проектирование на более высоком уровне с применением современных оптимизационных методов. К наиболее удобным для проведения оптимизационных расчётов при проектировании трансформаторов следует отнести следующие:

*Метод дихотомии (или половинного деления)* – согласно ему исходная длина интервала поиска экстремума  $[A, B]$  на каждой итерации уменьшается почти в два раза, что обеспечивает эффективный поиск  $x_{\text{opt}}$ .

*Метод Фибоначчи* – на каждой итерации отбрасывается интервал, хотя и меньший, чем по методу дихотомии, но здесь требуется выполнить только один расчёт, т. е. определить координату лишь одной точки –  $x_1$  или  $x_2$ , так как вторая совпадает с одной из точек, рассчитанных на предыдущей итерации.



*Метод «золотого» сечения.* Метод заключается в следующем: от концов исходного интервала исследования  $[A, B]$  откладывается величина  $(B-A) \times 0,618$ , получаются точки  $x_1$  и  $x_2$ , каждая из которых делит в том же соотношении оставшийся интервал исследования после отбрасывания одного из крайних  $[A, x_1]$  или  $[x_2, B]$ . Это позволяет сократить число необходимых расчетов на каждой итерации.

*Ненаправленный случайный поиск (или метод статических испытаний, метод Монте-Карло)* заключается в многократном моделировании независимых случайных вариантов решений из области допустимых, вычислении в каждом из них критерия оптимизации и запоминании ближайшего к экстремуму значения. Метод Монте-Карло относится к числу универсальных, поскольку позволяет решать задачи общего вида с отысканием глобального экстремума.

Таким образом, применение Mathcad при проектировании силового масляного трансформатора позволит не только рассчитать один из вариантов, удовлетворяющих заданию на курсовое проектирование, но и выбрать из ряда полученных вариантов наиболее приемлемый.

Алгоритм выполнения курсового проекта (рис. 1.1) состоит из функциональных блоков:

#### *1. Задание на курсовой проект (КП)*

До начала курсового проектирования необходимо заполнить бланк задания и подписать его у преподавателя. Только после этого данные могут быть внесены в программу.

#### *2. Расчёт основных электрических величин*

В этом блоке необходимо определить основные электрические величины: мощность на одну фазу (стержень) трансформатора, номинальные линейные и фазные токи и напряжения обмоток НН и ВН, активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания, испытательные напряжения обмоток. Испытательные напряжения для обмоток НН и ВН выбирают по табл. 2.1.

#### *3. Расчёт основных размеров трансформатора*

Этот блок условно можно показать с помощью следующих составляющих:

##### *3.1. Выбор материала и конструкции магнитной системы*

По заданной номинальной мощности  $S_N$  трансформатора следует предварительно выбрать из табл. 2.2 диаметр стержня, число ступеней и коэффициент  $k_{кр}$  с учётом способа прессовки стержня, марку электротехнической стали, толщину и способ изолирования пластин стали, коэффициент заполнения  $k_3$ , план шихтовки магнитопровода.

По заданной номинальной мощности  $S_N$  и выбранной марке стали следует предварительно выбрать из табл. 2.3 индукцию  $B_C$  в стержне.

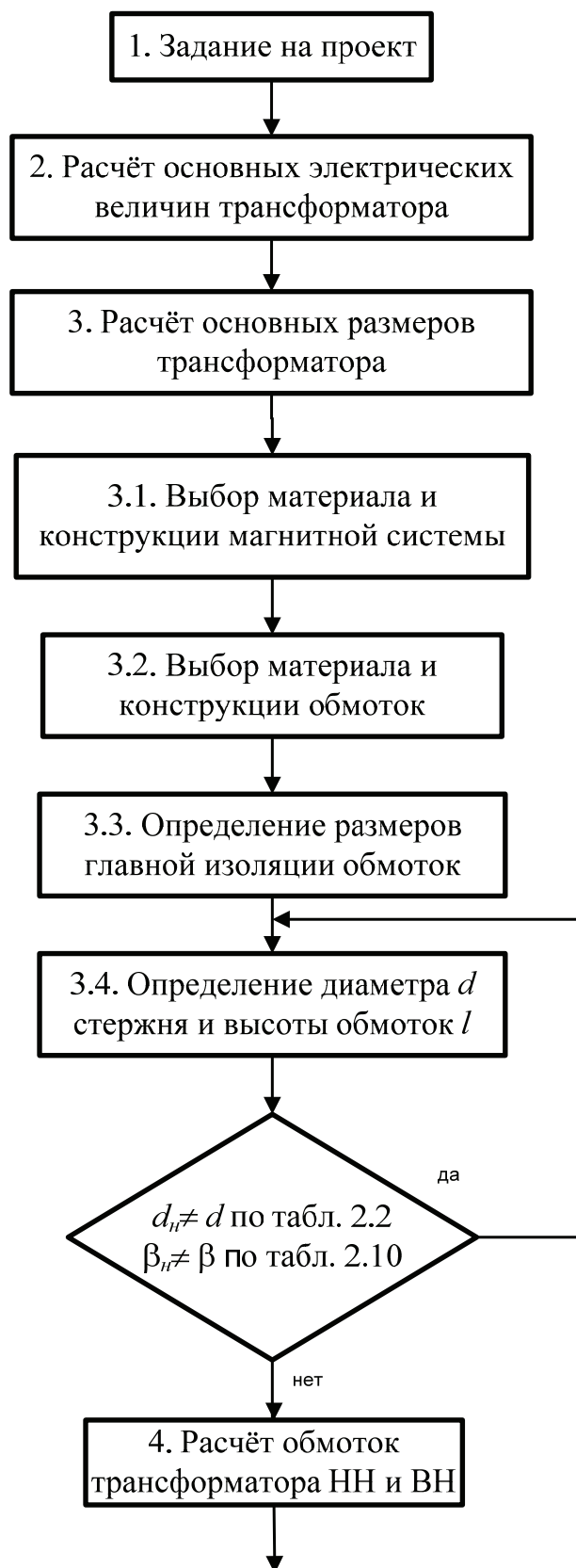


Рис. 1.1. Алгоритм курсового проекта  
(см. также с. 10–12).

На с. 10. Рис. 1.1. Продолжение

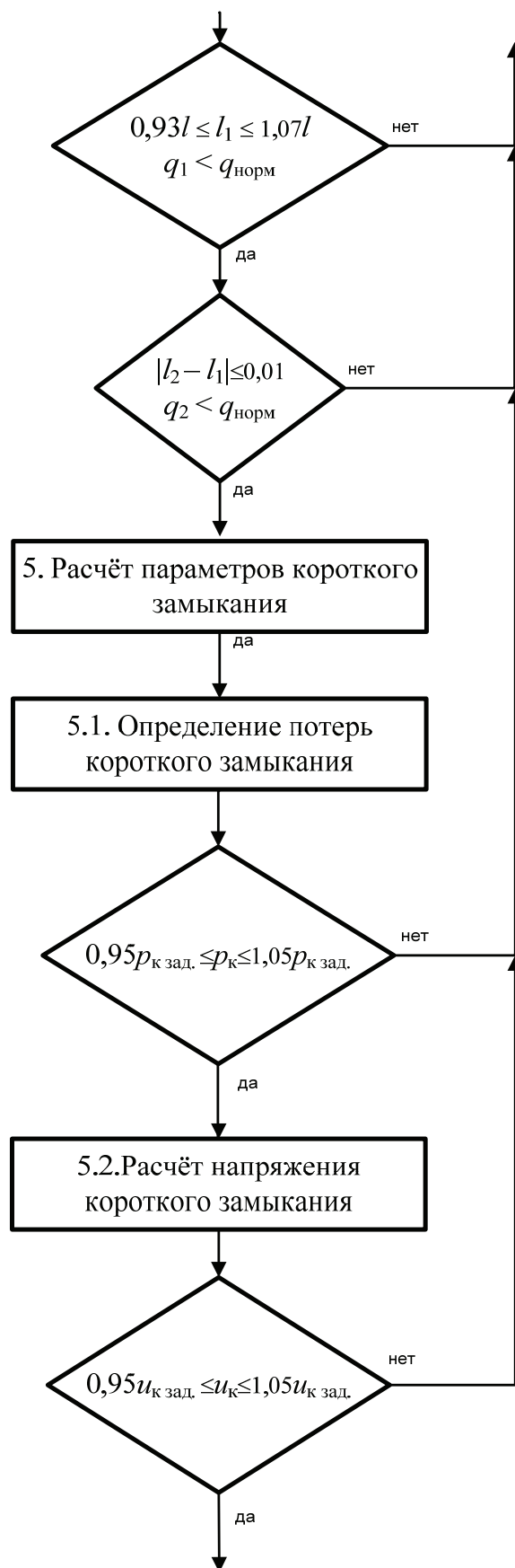


Рис. 1.1. Продолжение



Рис. 1.1. Продолжение



Рис. 1.1. Окончание

*Правильный выбор магнитной индукции  $B_C$  в стержне магнитопровода имеет большое значение. Увеличение расчётной индукции в стержне уменьшает массу магнитной системы, но сопровождается ухудшением энергетических характеристик трансформатора – увеличением магнитных потерь мощности и тока холостого хода. Уменьшение индукции  $B_C$  улучшает характеристики трансформатора за счёт увеличения массы и стоимости активной части.*

### *3.2. Выбор материала и конструкции обмоток*

Тип обмоток проектируемого трансформатора выбирают в соответствии с номинальными мощностью, напряжением и фазным током по табл. 2.6.

Если возможно применение нескольких типов обмоток для НН или ВН, следует отдать предпочтение более простому и дешёвому типу обмотки (ближе к верхней части табл. 2.6). В случаях, когда это возможно, следует выполнить обмотки ВН и НН одного типа.

### *3.3. Определение размеров главной изоляции обмоток*

Минимальные изоляционные расстояния главной изоляции масляных трансформаторов для испытательных напряжений 5–85 кВ выбирают по табл. 2.7 – для обмоток НН; по табл. 2.8 – для обмоток ВН, используя заданную номинальную мощность  $S_N$ , выбранные ранее испытательное напряжение  $U_{исп}$  и тип обмоток.

*В процессе расчёта эти размеры могут быть скорректированы (обычно в сторону увеличения).*

### *3.4. Определение диаметра стержня и высоты обмоток.*

Определяют ширину приведённого канала рассеяния, предварительное значение коэффициента  $\beta$  по табл. 2.10 и значение диаметра стержня трансформатора  $d$ .

Найденный диаметр  $d$  сравнивают со значениями диаметров в табл. 2.2. Если диаметр  $d$  выходит за границы табличных значений более чем на 5-7 %, проверяют исходные данные, корректируют значения коэффициента  $\beta$  и магнитной индукции  $B_C$  и повторяют расчет  $d$ .

По шкале нормализованных диаметров определяют ближайший к  $d$  нормализованный диаметр  $d_N$  по шкале нормализованных диаметров и определяют коэффициент  $\beta_N$ , соответствующий выбранному нормализованному диаметру  $d_N$ . Значение  $\beta_N$  должно находиться в пределах, указанных в табл. 2.10.

Далее рассчитывают предварительные диаметр канала между обмотками  $d_{12}$ , высоту обмотки и активное сечение стержня магнитопровода  $P_C$ .

*При окончательном расчёте магнитной системы сечение стержня  $P_C$  может быть скорректировано на 0,5–3,0 %. В процессе расчёта обмоток и магнитной системы предварительно найденные размеры могут быть уточнены и изменены.*

#### *4. Расчёт обмоток*

Расчёт обмоток НН и ВН проводят для выбранного типа обмотки по табл. 2.6. Сечение круглого провода выбирают по табл. 2.4, сечение прямоугольного – по табл. 2.5.

Ориентировочное значение сечения витка обмоток ВН и НН определяют по величине плотности тока и фазному току в соответствующей обмотке. Полное сечение витка с учётом параллельных проводов не должно отличаться от ориентировочного более чем на 5–7 %.

Высота обмотки не должна отличаться от предварительного значения  $l$  более чем на 5–7 %.

Полученное значение теплового потока  $q$  не должно превышать заданное значение для выбранного типа обмоток.

#### *5. Расчёт параметров короткого замыкания*

##### *5.1. Определение потерь короткого замыкания*

Определяют основные потери короткого замыкания в обмотках НН и ВН, добавочные потери в обмотках и элементах конструкции.

Потери короткого замыкания не должны отличаться более чем на  $\pm 5\%$  от значения  $P_K$  в задании на проектирование трансформатора.

Для увеличения потерь КЗ можно уменьшить сечение витка обмоток НН и ВН (увеличить плотность тока) и повторить расчёт.

Для уменьшения потерь КЗ возможно увеличить сечение витка обмоток НН и ВН (уменьшить плотность тока) и повторить расчёт.

##### *5.2. Расчёт напряжения короткого замыкания*

Рассчитанное значение  $u_K$  не должно отличаться от  $u_K$  в задании на проектирование трансформатора более чем на  $\pm 5\%$ .

В тех случаях, когда полученное значение  $u_K$  не входит в указанные пределы, изменяют индукцию  $B_C$  или диаметр стержня  $d_H$ . Небольших отклонений  $u_K$  в нужном направлении можно достичь, изменив длину обмоток  $l_1$  и  $l_2$ . Если  $u_K$  меньше заданного, следует увеличить  $a_p$  за счёт  $a_{12}$ .

##### *5.3. Определение механических сил в обмотках и нагрева обмоток при коротком замыкании*

В результате взаимодействия тока в обмотках с магнитным полем обмоток (полем рассеяния) возникают электромагнитные силы, оказывающие механическое действие на обмотки.

Для оценки механической прочности обмотки вычисляют напряжение сжатия в прокладках межкатушечной (межвитковой) и опорной изоляции и напряжение на разрыв обмотки.

Для обеспечения стойкости обмотки при воздействии радиальных сил рекомендуется не допускать  $\sigma_{СЖ.Р}$  в медных проводах более 30 МПа и в алюминиевых более 15.

#### *6. Определение размеров и массы магнитной системы и параметров холостого хода*

Определяют размеры пакетов и активных стержней и ярма, их массу и потери холостого хода. Потери холостого хода трансформатора  $P_x$  состоят из магнитных потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе, потерь в стальных элементах конструкции трансформатора от потоков рассеяния, электрических потерь в первичной обмотке от тока холостого хода и диэлектрических потерь в изоляции.

Полученное значение потерь холостого хода  $P_x$  не должно отличаться от заданного более чем на  $\pm 7,5 \%$ .

Полученное значение тока холостого хода не должно отличаться от заданного более чем на  $\pm 15 \%$ ,

#### *7. Тепловой расчёт трансформатора*

Проводят поверочный тепловой расчёт обмоток, расчёт системы охлаждения (бака радиаторов), превышений температуры обмоток и масла над воздухом.

Полученные значения превышений не должны отличаться от значений ГОСТ более чем на  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

При увеличенных более чем на  $5^\circ\text{C}$  превышениях температур следует увеличить площадь конвекции бака и радиаторов, а при уменьшенных площадь конвекции бака и радиаторов следует уменьшить.



## 2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

### 2.1. Расчет основных электрических величин

Для электромагнитного расчета трансформатора необходимо определить основные электрические величины: мощность на одну фазу и стержень, номинальные токи и напряжения, составляющие напряжения короткого замыкания, испытательные напряжения обмоток.

Мощность одного стержня (фазы) трансформатора, кВ·А,

$$S' = S_{\Phi} = S_H / m, \quad (2.1)$$

где  $S_H$  – номинальная полная мощность, кВ·А;  $m$  – число фаз трансформатора.

Номинальный линейный ток обмоток ВН и НН трансформатора, А,

$$I_L = S_H / (\sqrt{3} U_H), \quad (2.2)$$

где  $U_H$  – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки, кВ;  $S_H$  – номинальная полная мощность, кВ·А.

Фазные токи, А, и напряжения, В, обмоток ВН и НН трансформатора:

– при соединении обмоток в «звезду»

$$I_{\Phi} = I_L; \quad (2.3)$$

$$U_{\Phi} = U_L / \sqrt{3}; \quad (2.4)$$

– при соединении обмоток в «треугольник»

$$I_{\Phi} = I_L / \sqrt{3}; \quad (2.5)$$

$$U_{\Phi} = U_L. \quad (2.6)$$

Далее все величины, относящиеся к обмотке НН, обозначаются индексом 1, а относящиеся к обмотке ВН, – индексом 2.

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, %,

$$u_a = P_K / (10 S_H), \quad (2.7)$$

где  $P_K$  – потери короткого замыкания, Вт;  $S_H$  – номинальная полная мощность трансформатора, кВ·А.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %, определяется по заданному  $u_K$  и его активной составляющей

$$u_p = \sqrt{u_K^2 - u_a^2}. \quad (2.8)$$

Таблица 2.1

**Испытательные напряжения силовых масляных трансформаторов**

Класс напряжения, кВ	до 1	3	6	10	15	20	35
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	1,2	3,6	7,2	12,0	17,5	24,0	40,5
Испытательное напряжение частотой 50 Гц $U_{\text{исп}}$ , кВ	5,0	18,0	25,0	35,0	45,0	55,0	85,0

Классом напряжения силового трансформатора считают класс напряжения обмотки ВН. Классом напряжения обмотки называют ее длительно допустимое рабочее напряжение, которое равно номинальному напряжению сети, в которую включается обмотка. Каждому классу напряжения соответствуют испытательные напряжения при 50 Гц и импульсное. Для определения размеров главной изоляции следует выбрать испытательные напряжения обмоток НН и ВН по табл. 2.1.

## 2.2. Выбор материала и конструкции магнитной системы

Магнитная система служит конструктивной и механической основой трансформатора. Конструкции стержневых плоских магнитопроводов, рекомендуемых в данном учебном пособии к применению, рассмотрены в [1, 3, 4, 5].

Стержни и ярма плоской стержневой магнитной системы в поперечном сечении (рис. 2.1) имеют форму ступенчатой фигуры, составленной из пакетов пластин электротехнической стали. Диаметр  $d$  окружности, описанной вокруг ступенчатой фигуры сечения стержня, называется *диаметром стержня* и является одним из основных размеров трансформатора.

Для придания механической прочности и жёсткости стержню и ярму стягивают (прессуют) усилием, нормальным к плоскости пластин стали.

Стержни диаметром  $d \leq 0,22$  м расклинивают относительно твёрдого изоляционного цилиндра или обмотки НН, забивая между крайними пакетами пластин 1 и цилиндром 2 буковые планки 4, а в образованных уступах пакетов углах – буковые рейки 3 (рис. 2.2, а). Иногда стержни с  $d \leq 0,22$  м прессуют стальными пластинами 9, передающими усилия затяжки ярмовых балок крайним пакетам стержня (рис. 2.2, в).

При  $d \geq 0,22$  м на стержень накладывают прокладки из электрокартона 7; стальную полосу 8 и подбандажную изоляцию 5, выполненную из полос электрокартона толщиной 1–1,5 мм (рис. 2.2, б). Поверх изоляции наматывают 10–20 слоёв стеклотенты, пропитанной связующим, после полимеризации которого образуется прочный бандаж 6. Бандажи из стеклотенты накладывают с шагом по высоте стержня равным или кратным 120 мм.

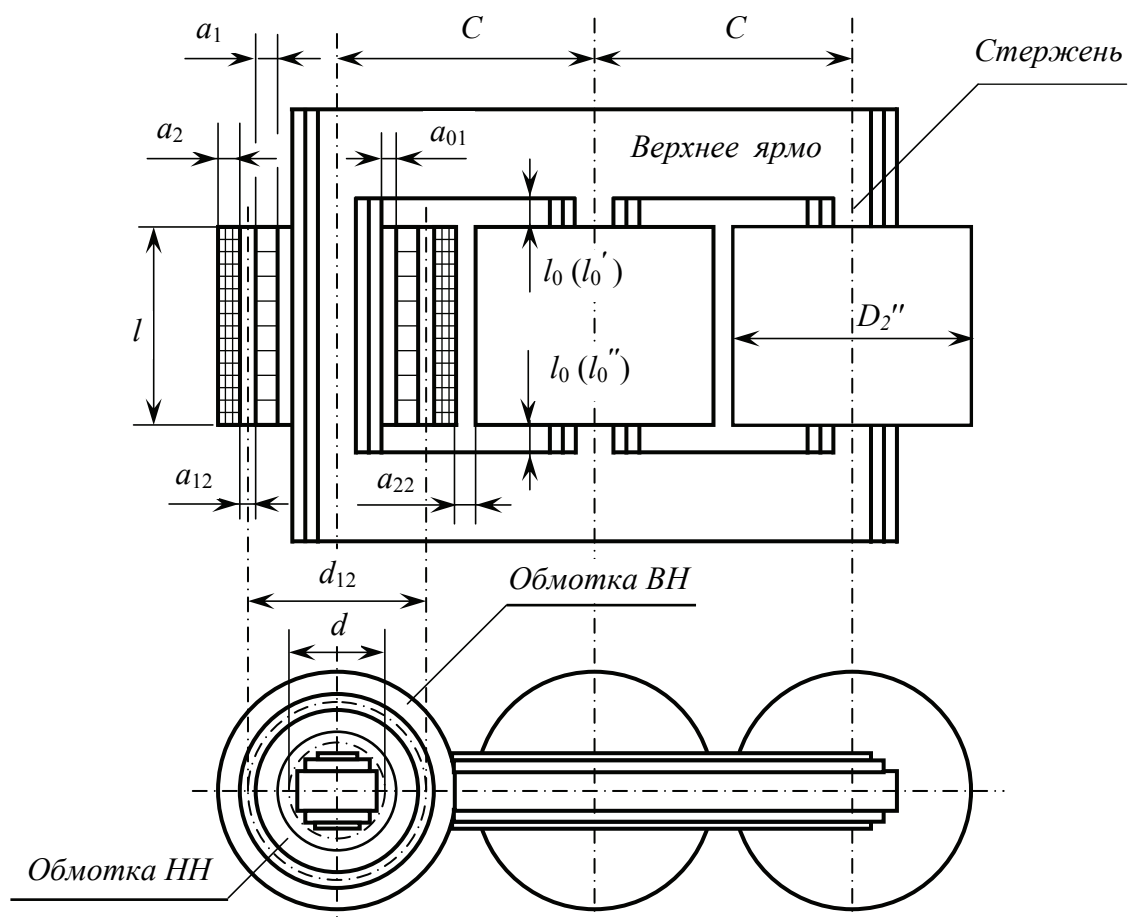


Рис. 2.1. Основные размеры трансформатора

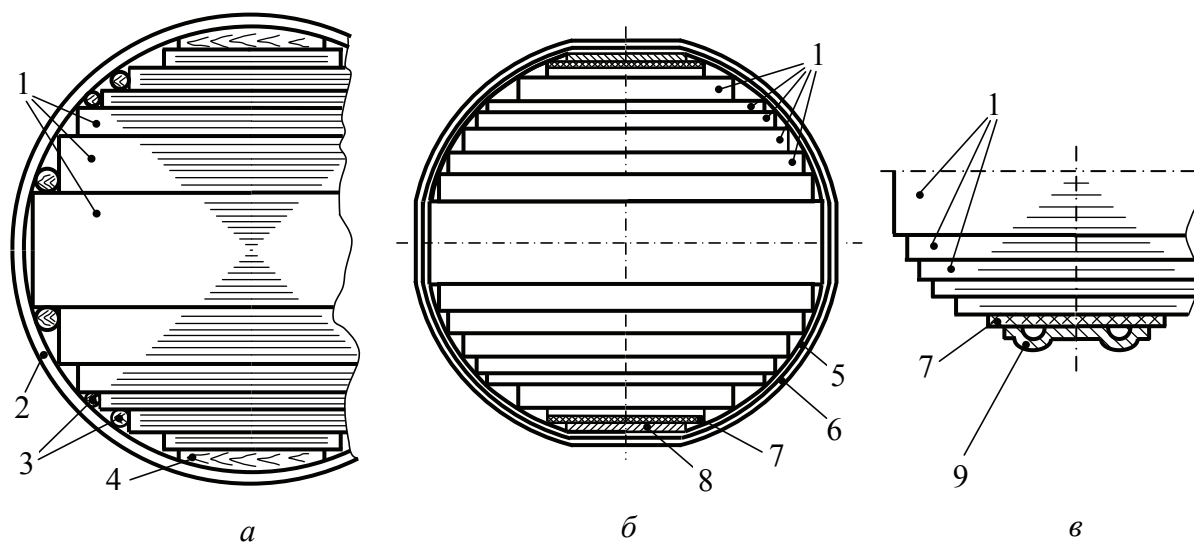


Рис. 2.2. Прессовка стержня: *а* — расклиниванием с изоляционным цилиндром; *б* — бандажами из стеклоленты; *в* — стальными пластинами

Подробнее способы прессовки стержней рассмотрены в [1, 3, 4, 5].

Ширину пакетов, образующих стержень, выбирают так, чтобы получить наибольшее сечение стержня при минимальных отходах стали. Число пакетов пластин в одной половине круга диаметром  $d$  называется *числом ступеней в сечении стержня*. Увеличение числа ступеней повышает коэффициент заполнения круга площадью ступенчатой фигуры  $k_{\text{кр}}$ , равный отношению площади сечения ступенчатой фигуры  $S_{\text{фс}}$  стержня к площади  $S_{\text{кр}}$  круга диаметром  $d$ . Коэффициент  $k_{\text{кр}}$  зависит также и от способа прессовки стержня.

Увеличение  $k_{\text{кр}}$  уменьшает диаметры, массу и стоимость обмоток трансформатора, но усложняет изготовление магнитопровода.

В табл. 2.2 приведены ориентировочные значения диаметров  $d$ , числа ступеней и коэффициента  $k_{\text{кр}}$  для проектируемых трансформаторов.

По заданной номинальной мощности  $S_{\text{н}}$  трансформатора следует предварительно выбрать из табл. 2.2 диаметр стержня, число ступеней и коэффициент  $k_{\text{кр}}$  с учётом способа прессовки стержня. Предварительно способ прессовки можно выбрать по примечаниям к табл. 2.2 или данным, приведенным в [1, 3, 4, 5].

Таблица 2.2

**Диаметр и число ступеней стержня, коэффициент заполнения круга**

Мощность трансформатора $S_{\text{н}}$ , кВ·А	Ориентировочный диаметр стержня $d$ , м	Без прессующей пластины		С прессующей пластиной	
		число ступеней	коэффициент $k_{\text{кр}}$	число ступеней	коэффициент $k_{\text{кр}}$
до 16	до 0,08	1	0,636	—	—
		2	0,786	—	—
		3	0,851	—	—
16	0,08	4	0,861	—	—
25	0,09	5	0,890	—	—
от 40 до 100	0,10 – 0,14	6	0,91 – 0,92	—	—
от 160 до 630	0,15 – 0,18	6	0,913	—	—
	0,2	7	0,918	6	0,884
	0,22	8	0,928	7	0,901
от 1000 до 1600	0,23 – 0,26	8	0,925	7	0,9
	0,25 – 0,29	8	0,928	7	0,9 – 0,91
от 2500 до 6300	0,30 – 0,34	9	0,929	8	0,912
	0,34 – 0,38	9	0,913	8	0,89 – 0,9
10000	0,38 – 0,42	11	0,922	10	0,907

*Примечания:* 1. При диаметре стержня до 0,22 м стержни прессуют расклиниванием с обмоткой, сечение стержня без канала.

2. При диаметре стержня более 0,22 м стержни прессуют бандажами, сечение стержня диаметром 0,36 м и более имеет продольные охлаждающие каналы.

3. В коэффициенте  $k_{\text{кр}}$  учтено наличие каналов в сечении стержня.

Магнитопроводы современных трансформаторов собирают из пластин рулонной холоднокатаной анизотропной электротехнической стали марок 3404, 3405, 3406, 3407, 3408 толщиной 0,35; 0,3; 0,27 мм. Для снижения трудоёмкости изготовления и стоимости магнитопровода в большинстве силовых трансформаторов используют более дешёвые марки стали 3404 и 3405 с толщиной листов 0,35 и реже 0,3 мм. Магнитопроводы силовых трансформаторов для уменьшения потерь холостого хода собирают из пластин толщиной 0,27 мм или из более дорогих высококачественных сталей марок 3406–3408.

Для уменьшения вихревых токов и потерь мощности от них холоднокатаные стали изготавливают с двусторонним термостойким электроизоляционным покрытием.

Изоляционные покрытия уменьшают чистую площадь стали, что учитывают коэффициентом заполнения стали  $k_3$ , численно равным отношению чистого сечения стали к полному сечению пакета стали. Для холоднокатаных сталей с термостойким покрытием:

- при толщине листов стали 0,35 мм  $k_3 = 0,97$ ;
- при толщине листов стали 0,3 мм  $k_3 = 0,96$ ;
- при толщине листов стали 0,27 мм  $k_3 = 0,95$ .

В случае прессовки стержней расклиниванием с внутренней обмоткой или изоляционным цилиндром ( $S_H \leq 630$  кВ·А) указанные значения  $k_3$  следует уменьшить на 0,01.

Магнитопроводы из холоднокатаных анизотропных сталей шихтуют с косыми или комбинированными стыками пластин в углах магнитной системы (рис. 2.3). За счёт этого уменьшаются добавочные потери мощности в углах магнитопровода. Также снижается магнитное сопротивление в углах магнито-провода и ток холостого хода трансформатора.

Наименьшие потери и ток холостого хода обеспечивает наиболее сложная технологически шихтовка с шестью косыми стыками (рис. 2.3, а). Технологически проще сборка магнитной системы с четырьмя косыми и двумя прямыми стыками (рис. 2.3, б) с более высокими потерями и током холостого хода. Средней по технологичности и величине потерь и тока холостого хода является схема с косыми стыками в четырех углах и чередующимися прямым и косым стыками на среднем стержне (рис. 2.3, в, г).

Используя приведенные общие рекомендации или специальные требования к характеристикам магнитопровода, следует выбрать марку электротехнической стали, толщину и способ изолирования пластин стали, коэффициент  $k_3$ . План шихтовки магнитопровода можно выбрать по рис. 2.3.

Коэффициент заполнения сталью площади круга, описанного вокруг ступенчатой фигуры сечения стержня,

$$k_C = k_{\text{кр}} k_3. \quad (2.9)$$

Большое значение имеет правильный выбор магнитной индукции  $B_C$  в стержне магнитопровода. Увеличение расчётной индукции в стержне уменьшает массу магнитной системы, но сопровождается ухудшением энергетических характеристик трансформатора: увеличением магнитных потерь мощности и тока холостого хода. Уменьшение индукции  $B_C$  улучшает характеристики трансформатора за счёт увеличения массы и стоимости активной части.

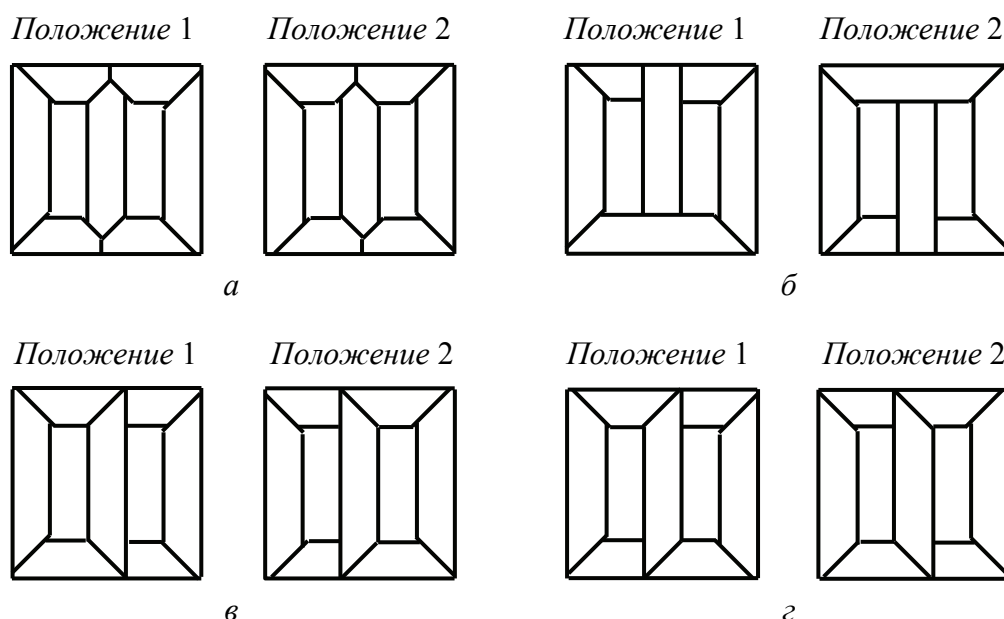


Рис. 2.3. Схемы шихтовки магнитопроводов

В табл. 2.3 приведены значения расчетной магнитной индукции  $B_C$  в стержнях трансформаторов с удовлетворительными потерями и током холостого хода при близком к минимальному расходе электротехнической стали.

Таблица 2.3

**Рекомендуемая индукция  $B_C$  в стержнях трансформаторов, Тл**

Марка стали	Мощность трансформатора $S_H$ , кВ·А		
	до 16	25 – 100	100 и более
3404, 3405, 3406, 3407, 3408	1,5 – 1,55	1,55 – 1,60	1,55 – 1,65

По заданной номинальной мощности  $S_H$  и выбранной марке стали следует предварительно выбрать из табл. 2.3 индукцию  $B_C$  в стержне.

## 2.3. Выбор материала и конструкции обмоток

Проводник, однократно охватывающий стержень магнитопровода, называют *витком*. Изменяющийся во времени магнитный поток стержня индуцирует в витках ЭДС. В зависимости от величины тока виток состоит из одного или нескольких параллельно соединённых изолированных проводников.

*Обмоткой* называют образованную последовательным соединением витков электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС отдельных витков. Обмотки масляных трансформаторов мотают медным или алюминиевым проводом круглого или прямоугольного сечения марок ПБ и АПБ. Провод изолирован по классу нагревостойкости А (105 °С) лентами кабельной бумаги.

Сортамент обмоточных проводов круглого сечения приведен в табл. 2.4, прямоугольного сечения в табл. 2.5. Для учета неплотности намотки обмоток, отклонений диаметра провода и толщины изоляции от номинальных размеры катушек следует считать по толщине изоляции, указанной в скобках.

Таблица 2.4

**Размеры медного и алюминиевого обмоточного провода круглого сечения марок ПБ и АПБ с толщиной изоляции на две стороны  $2\delta = 0,30 (0,40)$  мм**

Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Увеличение массы, %	Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Увеличение массы, %	Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Увеличение массы, %	Диаметр, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Увеличение массы, %
Марка ПБ – медь			1,70	2,27	4,0	3,00	7,07	2,5	5,00	19,63	1,5
			1,80	2,545	3,5	3,15	7,795	2,0	5,20	21,22	1,5
1,18	1,094	6,0 5,5	1,90	2,805	3,5	3,35	8,81	2,0	Марка АПБ – алюминий		
1,25	1,23		2,00	3,14	3,0	3,55	9,895	2,0			
Марки ПБ – медь, АПБ – алюминий			2,12	3,53	3,0	3,75	11,06	1,5			
			2,24	3,94	3,0	4,00	12,55	1,5			
1,32	1,37	5,0	2,36	4,375	2,5	4,10	13,2	1,5	5,30	22,06	1,5
1,40	1,51	5,0	2,50	4,91	2,5	4,25	14,2	1,5	6,00	28,26	1,5
1,50	1,77	4,5 4,0	2,65	5,515	2,5	4,50	15,9	1,5	8,00	50,24	1,0
1,60	2,015		2,80	6,16	2,5	4,75	17,7	1,5			

*Примечания:* 1. Провод всех диаметров выпускается с изоляцией на две стороны толщиной  $2\delta = 0,30 (0,40)$  для обмоток напряжением до 35 кВ.

2. Размеры катушек считать по толщине изоляции, указанной в скобках. Вне скобок приведена номинальная толщина изоляции.

3. Увеличение массы за счет изоляции дано для медного провода с  $2\delta = 0,30 (0,40)$ . Для алюминиевого провода АПБ данные таблицы по увеличению массы необходимо умножить на 3,3. Данные по увеличению массы проводов с усиленной изоляцией  $2\delta > 0,30 (0,40)$  приведены в [1].

При расчете в главе 3 выбранного типа обмоток, с учетом полученного предварительного сечения провода по таблицам сортамента проводов (табл. 2.4 и 2.5), подбирают ближайшее стандартное сечение витка или одного из параллельных проводов, составляющих виток обмотки.

Для рассматриваемых в пособии трансформаторов классов напряжения до 35 кВ включительно применяют *концентрические* обмотки в виде цилиндров, концентрически установленных на стержне. Обмотку НН легче изолировать от стержня, и её обычно размещают внутри обмотки ВН (рис. 2.1).

По способу намотки различают цилиндрические, винтовые и катушечные обмотки. Различают *направление намотки* обмоток: *правое*, если от обращённого вверх конца обмотки обход витка идет по часовой стрелке, и *левое*, если обход витка идет против часовой стрелки.

Наиболее просты *цилиндрические обмотки*, витки которых состоят из одного или нескольких параллельных проводов, плотно намотанных по высоте обмотки (рис. 2.4). Витки, намотанные на цилиндрической поверхности одного диаметра, образуют *слой* обмотки.

В качестве обмоток НН напряжением до 1 кВ трансформаторов мощностью  $S_H \leq 630$  кВ·А включительно обычно применяют *одно- или двухслойные* обмотки из провода прямоугольного сечения 2 (рис. 2.4, а, б).

Поверхность крайних витков слоя выравнивают кольцами 1, 3 из отрезка бумажно-бакелитового цилиндра. Один торец кольца обрезан по соответствующей ходу витков винтовой линии. В кольце есть разрез для вывода начала а или конца х обмотки и перехода витка из одного слоя в другой.

Слои двухслойной обмотки разделены рейками (планками) 4 из бука или электрокартона, образующими вертикальный (осевой) канал 5 для изоляции слоев и движения охлаждающего масла.

При переходе витка из одного слоя в другой направление намотки меняется. Поэтому у цилиндрических обмоток с числом слоёв больше одного направление намотки принимают по направлению намотки внутреннего слоя, т. е. на рис. 2.4, б показана двухслойная обмотка с левой намоткой.

В качестве обмоток ВН напряжением 3–35 кВ часто применяют многослойные цилиндрические обмотки (рис. 2.4, в, г) с числом слоёв от 4 до 20. Обмотки наматывают непосредственно на бумажно-бакелитовый цилиндр б или на вертикальные рейки, закреплённые на его поверхности. В последнем случае рейки образуют осевой канал между обмоткой и цилиндром.

В каждом слое много витков, и напряжение между первым витком одного слоя и последним витком следующего слоя велико. Поэтому электрическая прочность собственной изоляции провода этих витков обычно недостаточна, и слои обмотки дополнительно изолируют цилиндрами 7 из кабельной бумаги.



**Размеры и сечения медного и алюминиевого обмоточного провода**  
**Медный провод марки ПБ – все размеры таблицы, за исключением**  
**Алюминиевый провод марки АПБ – все размеры таблицы вправо и**

$\begin{matrix} a \\ b \end{matrix}$	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65
3,75	5,04	—	5,79	—	6,39	—	7,14	—	8,04	—	8,83	—
4,00	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1
4,25	5,74	—	6,59	—	7,29	—	8,14	—	9,16	—	10,1	—
4,50	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4
4,75	6,44	—	7,39	—	8,19	—	9,14	—	10,3	—	11,3	—
5,00	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7
5,30	7,21	—	8,27	—	9,18	—	10,2	—	11,5	—	12,7	—
5,60	7,63	8,19	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3
6,00	8,19	—	9,39	—	10,4	—	11,6	—	13,1	—	14,5	—
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2
6,70	9,17	—	10,5	—	11,7	—	13,0	—	14,7	—	16,2	—
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3
7,50	10,3	—	11,8	—	13,1	—	14,6	—	16,4	—	18,2	—
8,00	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7
8,50	11,7	—	13,4	—	14,9	—	16,6	—	18,7	—	20,7	—
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,	20,7	22,0	23,3
9,50	13,1	—	15,0	—	16,7	—	18,6	—	20,9	—	23,2	—
10,00	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,1	24,5	26,0
10,60	14,6	—	16,8	—	18,7	—	20,8	—	23,4	—	26,0	—
11,20	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1
11,80	—	—	18,7	—	20,9	—	23,2	—	26,1	—	29,0	—
12,50	—	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,6
13,20	—	—	—	—	23,4	—	26,0	—	29,2	—	32,5	—
14,00	—	—	—	—	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6
15,00	—	—	—	—	—	—	29,6	—	33,2	—	37,0	—
16,00	—	—	—	—	—	—	31,6	33,6	35,5	37,2	39,5	41,9
17,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*Примечания:* 1. Провод выпускается с толщиной изоляции на две стороны  
2. Размеры катушек считать по толщине изоляции, указанной в скобках. Вне скобок

Таблица 2.5

марок ПБ и АПБ (размеры  $a$  и  $b$  – в мм, сечения – в мм<sup>2</sup>)  
 провода с размером  $b$ , равным 17 и 18 мм  
 вверх от жирной черты

2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60	$\frac{a}{b}$
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>3,75</b>
10,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>4,00</b>
11,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>4,25</b>
12,1	13,0	13,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>4,50</b>
12,8	–	14,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>4,75</b>
13,5	11,5	15,2	16,2	17,2	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>5,00</b>
14,3	–	16,2	–	18,3	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>5,30</b>
15,1	16,3	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5	–	–	–	–	–	–	<b>5,60</b>
16,3	–	18,4	–	20,8	–	23,1	–	–	–	–	–	–	<b>6,00</b>
17,1	18,4	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5	–	–	–	–	<b>6,30</b>
18,2	–	20,6	–	23,2	–	25,9	–	29,3	–	–	–	–	<b>6,70</b>
19,3	20,8	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6	–	–	<b>7,10</b>
20,5	–	23,1	–	26,1	–	29,1	–	32,9	–	36,6	–	–	<b>7,50</b>
21,9	23,5	24,7	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	37,1	39,2	41,5	43,9	<b>8,00</b>
23,3	–	26,2	–	29,6	–	33,1	–	37,4	–	41,6	–	46,7	<b>8,50</b>
24,7	26,5	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5	<b>9,00</b>
26,1	–	29,4	–	33,2	–	37,1	–	41,9	–	46,6	–	52,1	<b>9,50</b>
27,5	29,5	31,0	33,0	35,0	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1	<b>10,00</b>
29,1	–	32,8	–	37,1	–	41,5	–	46,8	–	52,1	–	58,5	<b>10,60</b>
30,8	33,1	33,7	37,0	39,2	41,4	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9	<b>11,20</b>
32,5	–	36,6	–	41,3	–	46,3	–	52,2	–	58,1	–	65,2	<b>11,8</b>
34,5	37,0	38,0	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1	<b>12,5</b>
36,4	–	41,0	–	46,3	–	51,9	–	58,5	–	65,1	–	73,1	<b>13,20</b>
38,7	41,5	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5	<b>14,0</b>
41,5	–	46,7	–	52,7	–	59,1	–	66,6	–	74,1	–	83,1	<b>15,00</b>
44,3	47,5	49,9	53,1	56,3	59,1	63,1	67,1	71,1	75,1	79,1	83,9	88,7	<b>16,0</b>
47,2	–	53,2	–	59,4	–	67,1	–	75,6	–	84,1	–	94,3	<b>17,0</b>
–	53,1	55,8	59,4	63,0	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,5	99,9	<b>18,0</b>

28 = 0,45 (0,50); 0,55(0,62); 0,72(0,82); 0,96(1,06); 1,29(1,35); 1,35(1,50); 1,68(1,83) и 1,92(2,07).  
 приведена номинальная толщина изоляции.

Межслойная изоляция уменьшает теплопроводность многослойных обмоток и ухудшает охлаждение проводников. Для увеличения поверхности охлаждения обмотку делят на две (реже три) катушки осевым охлаждающим каналом 5 (рис. 2.4, в, з), образованным рейками из электрокартона или бука (при напряжении до 10 кВ). Внутренняя катушка меньше обтекается маслом и охлаждается хуже внешней катушки, поэтому внутренняя катушка содержит (0,3–0,4), а внешняя – (0,6–0,7) от общего числа слоёв обмотки.

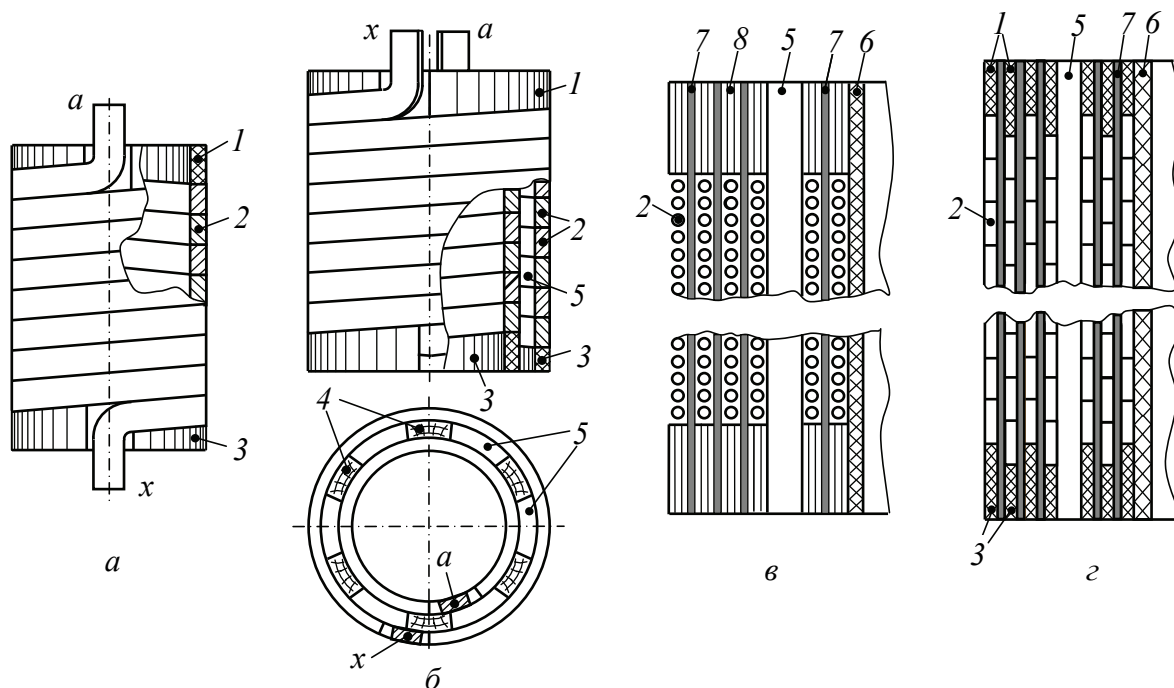


Рис. 2.4. Цилиндрические обмотки: а – однослойная; б – двухслойная; в, з – многослойные

В трансформаторах мощностью  $S_H \leq 630$  кВ·А многослойные цилиндрические обмотки мотают проводом круглого сечения (рис. 2.4, в). Высоту слоёв обмотки выравнивают бортиками 8, свёрнутыми из полос электрокартона в виде цилиндра с толщиной стенки равной диаметру изолированного провода.

Вследствие неплотности намотки и малой опорной поверхности проводов одного слоя механическая устойчивость многослойных обмоток из провода круглого сечения к действию осевых электромагнитных сил при коротких замыканиях невелика. Это характерно и для одно- и двухслойных цилиндрических обмоток из провода прямоугольного сечения. Такие обмотки применяют для трансформаторов небольших мощностей (не более 630 кВ·А).



набором прокладок 2 из электрокартона. Для фиксации от смещения прокладки нанизывают просечками на направляющую полосу 8 рейки 5.

С торцов обмотка закрыта опорными кольцами 1, 4 из электрокартона с вырезом для вывода конца 7 обмотки (рис. 2.6). Винтовую поверхность крайних ходов выравнивают постепенным увеличением высоты прокладок 2 между торцом крайнего сверху или снизу обмотки хода и опорным кольцом.

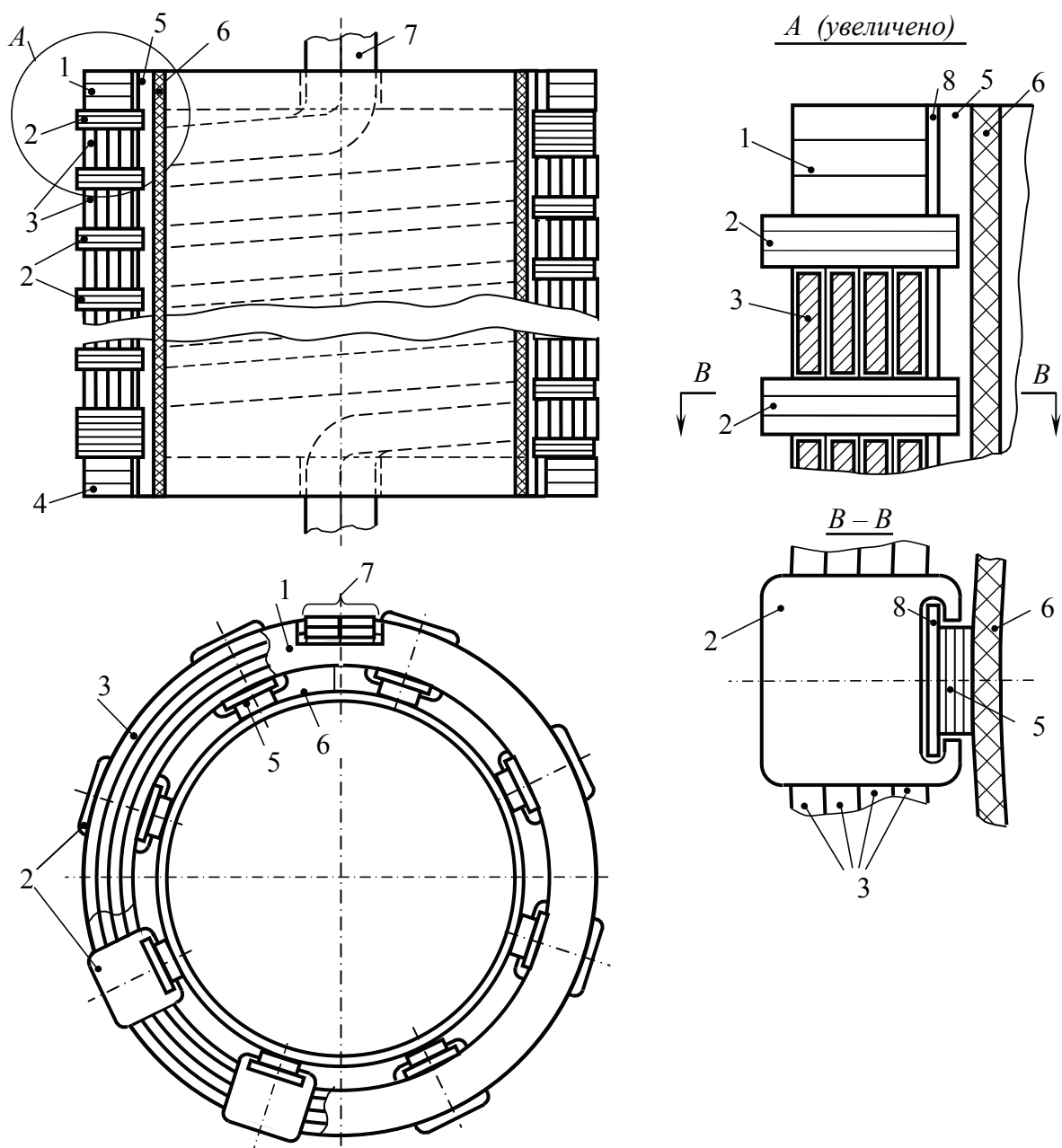


Рис. 2.6. Винтовая одноходовая обмотка

Параллельные провода хода винтовой обмотки намотаны концентрически, и длина их не равна. Различно и положение проводов в быстро

изменяющемся вдоль радиуса магнитном поле рассеяния обмоток с индукцией  $B$  (рис. 2.7). Вследствие этого активное и индуктивное сопротивление параллельных проводов хода витка и токи в этих проводах будут различны.

Для выравнивания токов между параллельными проводами при намотке делают транспозицию (перекладку) проводов так, что каждый провод занимает по длине обмотки все положения, возможные в сечении витка.

Это возможно только в двухходовой обмотке, параллельные провода которой делятся поровну между двумя ходами (рис. 2.7, *а*).

Перекладку проводов из одного положения в другое выполняют за счет перехода двух проводов из одного хода в другой.

Число перекладок обычно равно числу параллельных проводов  $n_B$  (или вдвое больше). В обмотке с  $w$  витков транспозиции делают через  $w/n_B$  витков, а расстояние от начала и конца обмотки соответственно до первой и последней транспозиции равно  $w/(2n_B)$ .

Например, в двухходовой обмотке (рис. 2.7, *а*) с числом параллельных проводов  $n_B = 8$  транспозиции первая и последняя выполнены на расстоянии  $w/16$  витков от конца и начала обмотки, остальные – через  $w/8$  витков (показаны только провода номер 1 и 5).

Такая транспозиция называется равномерно распределенной. Она не увеличивает осевой размер обмотки, но в месте перехода провода

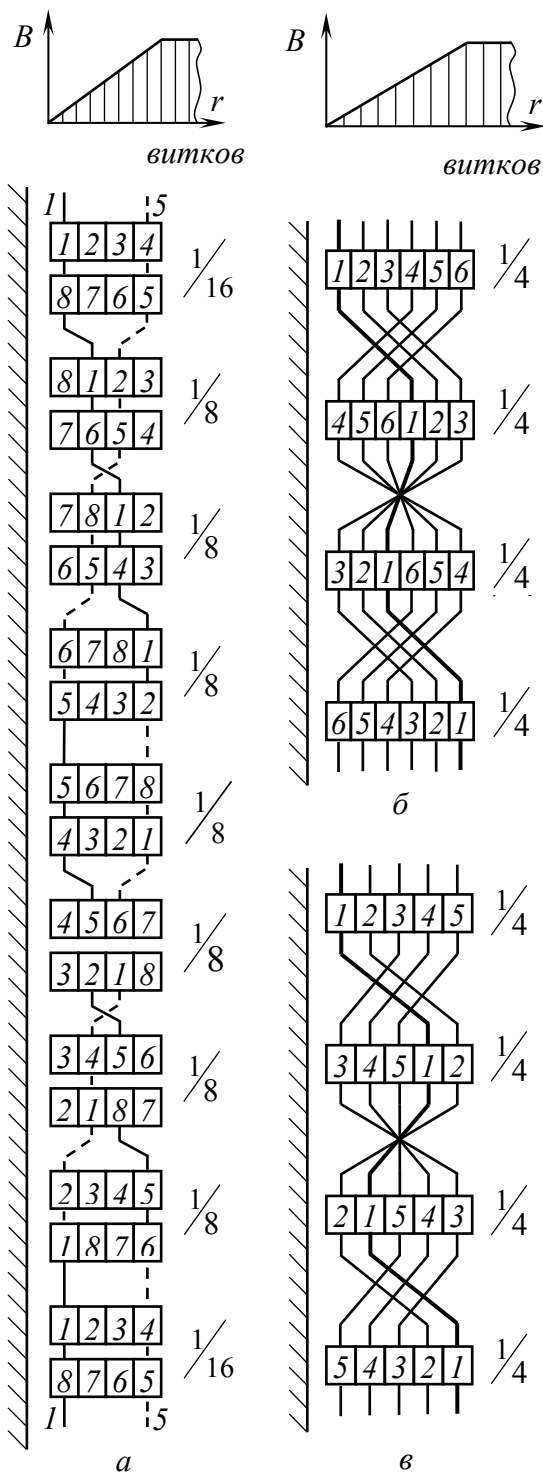


Рис. 2.7. Схемы транспозиции параллельных проводов в винтовых обмотках: *а* – двухходовой; *б*, *в* – одноходовой

из одного хода в другой толщина (радиальный размер) увеличивается на толщину одного изолированного провода, что следует учитывать при определении изоляционных расстояний.

В четырёхходовой обмотке равномерную распределенную транспозицию выполняют в каждой паре ходов.

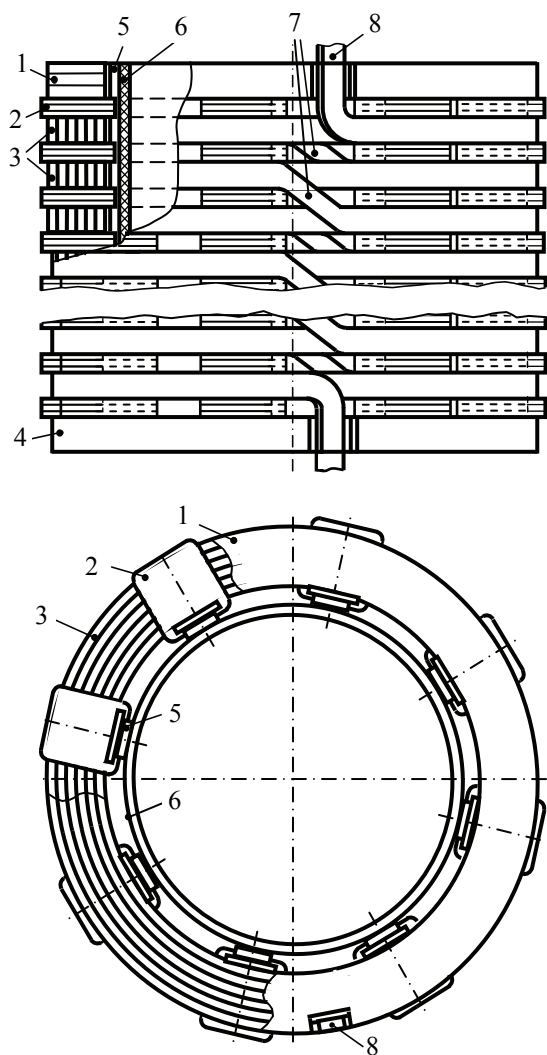


Рис. 2.8. Непрерывная катушечная обмотка

В одноходовой обмотке с  $w$  витков делают три транспозиции с расстоянием между ними равным  $w/4$  (рис. 2.7, б, в). В середине обмотки делают общую транспозицию, изменяющую положение всех проводов на обратное. Две другие транспозиции делают групповыми, для чего  $n_B$  параллельных проводов хода делят на две группы с равным при чётном  $n_B$  (рис. 2.7, б) или отличающимся на единицу при нечётном  $n_B$  (рис. 2.7, в) числе проводов, и меняют местами эти группы проводов. Каждая транспозиция увеличивает осевой размер обмотки на высоту витка и радиального канала. Такая транспозиция полностью выравнивает сопротивления только для четырёх проводов ( $n_B = 4$ ). При  $n_B > 4$  сопротивления проводов и токи в них будут немного отличаться.

Преимущество винтовых обмоток по сравнению с одно- и двухслойными цилиндрическими состоит в высокой электрической и механической прочности, устойчивости к осевым силам, большой поверхности охлаждения.

При напряжении 3 кВ и более применяют катушечные обмотки, образованные последовательным соединением от 20 до 100 и более катушек (рис. 2.8).

Катушки мотают в виде плоских концентрических спиралей проводом прямоугольного сечения 3 на широкую сторону (плашмя). В каждой катушке два и больше витков, в витке от одного до четырёх параллельных изолированных проводов.

Таблица 2.6

## Основные свойства и нормальные пределы применения различных типов обмоток масляных трансформаторов

Тип обмотки	Применение на стороне		Основные достоинства	Основные недостатки	Материал обмоток	Пределы применения, включительно				Число параллельных проводов		Схема регулирования напряжения приращения
	основное	возможное				по мощности $S_N$ , кВ·А	по току на стержень $I$ , А	по напряжению $U$ , кВ	по сечению витка $\Pi$ , мм <sup>2</sup>	от	до	
Цилиндрическая одно- или двухслойная из провода прямоугольного сечения	НН	—	Простая технология изготовления, хорошее охлаждение	Малая механическая прочность	Медь	До 630	От 15–18 до 800	До 6	От 5,04 до 250	1	4–8	
					Алюминий		От 10–13 до 650		От 6,39 до 300			
Цилиндрическая многослойная из провода прямоугольного сечения	ВН	НН	Хорошее заполнение окна магнитной системы, простая технология намотки	Худшее охлаждение, чем у обмоток с радиальными каналами	Медь	От 630 до 80000	От 15–18 до 1200	10 и 35	От 5,04 до 400	1	4–8	Рис. 3.7, а, б
					Алюминий	До 25000	От 10–13 до 1200		От 6,39 до 500			
Цилиндрическая многослойная из провода круглого сечения	ВН	НН	Простая технология изготовления	Ухудшение теплоотдачи, малая механическая прочность	Медь	До 630	От 0,3 до 100	До 35	От 1,1 до 42,44	1	1	Рис. 3.7, а, б
					Алюминий		От 2 до 135		От 1,37 до 50,24	1	2	
Винтовая одно-, двух- и многоходовая из провода прямоугольного сечения	НН	—	Высокая электрическая и механическая прочность, надежная изоляция, хорошее охлаждение	Более высокая стоимость по сравнению с цилиндрической обмоткой	Медь	От 160 и выше	От 300 и выше	До 35	От 75 и выше	4	12–16 и более	—
					Алюминий	От 100 и выше	От 150 и выше					
Непрерывная катушечная из провода прямоугольного сечения	ВН	НН		Необходимость перекладки проволоки катушек при намотке	Медь	От 160 и выше	От 15 и выше	От 3 до 220	От 5,04 и выше	1	3–5	Рис. 3.7, в, г
					Алюминий	От 100 и выше	От 10 и выше		От 6,39 и выше			



Часто все катушки мотают без разрыва проводов, и обмотку называют *непрерывной катушечной*.

Катушки разделены закреплёнными на рейках 5 прокладками 2, образующими радиальные охлаждающие каналы (рис. 2.8). Соединения 7 (переходы) между катушками делают изгибом проводов на ребро.

Если в витке число параллельных проводов  $n_B > 1$ , то для каждого провода переход между катушками выполняют отдельно со смещением по окружности витка на одну межкатушечную прокладку 2 (рис. 2.8).

В переходе делают транспозицию, изменяющую радиальное положение провода в витке, вследствие чего параллельные провода витка меняются местами, и распределение тока в них выравнивается.

В трансформаторах мощностью до 2500 кВ·А с достаточной поверхностью охлаждения проводников применяют сдвоенные или двойные катушки.

В этом случае каналы делают через две катушки, отделённые одна от другой двумя шайбами из электрокартона толщиной 0,5 мм.

Преимущество катушечных обмоток – высокие электрическая и механическая прочность, хорошие условия охлаждения, но изготовление их сложнее, чем цилиндрических и винтовых обмоток.

Более подробно устройство обмоток рассмотрено в [1, 4, 5, 6].

В табл. 2.6 приведены основные характеристики и границы применения наиболее часто используемых в масляных трансформаторах обмоток.

Тип обмоток проектируемого трансформатора следует выбрать в соответствии с номинальными мощностью, напряжением и током одного стержня, а также рекомендациями табл. 2.6.

Если к трансформатору предъявляются какие-либо специальные требования, следует выбирать наиболее отвечающий этим требованиям тип обмотки. Если возможно применение двух типов обмотки, следует отдавать предпочтение более простому и дешёвому в производстве типу обмотки. По возможности следует выполнять обмотки ВН и НН одного типа.

## **2.4. Определение размеров главной изоляции обмоток**

Изоляцию находящихся под напряжением частей между собой и от заземленных частей трансформатора выполняют из твердых диэлектриков – электроизоляционного картона, кабельной бумаги, лакоткани, дерева, фарфора и других материалов. В масляных трансформаторах части изоляционных промежутков, не занятые твердым диэлектриком, заполнены жидким диэлектриком – трансформаторным маслом.

Изоляцию каждой обмотки от других обмоток и от заземленных частей называют *главной* изоляцией (рис. 2.9).

Изоляцию между обмотками ВН и НН осуществляют жесткими бумажно-бакелитовыми цилиндрами или мягкими цилиндрами из электрокартона. Выступы цилиндров  $l_{ц1}$ ,  $l_{ц2}$  за высоту обмотки (рис. 2.9) исключают разряды по поверхности цилиндра между обмотками или с обмотки на стержень.

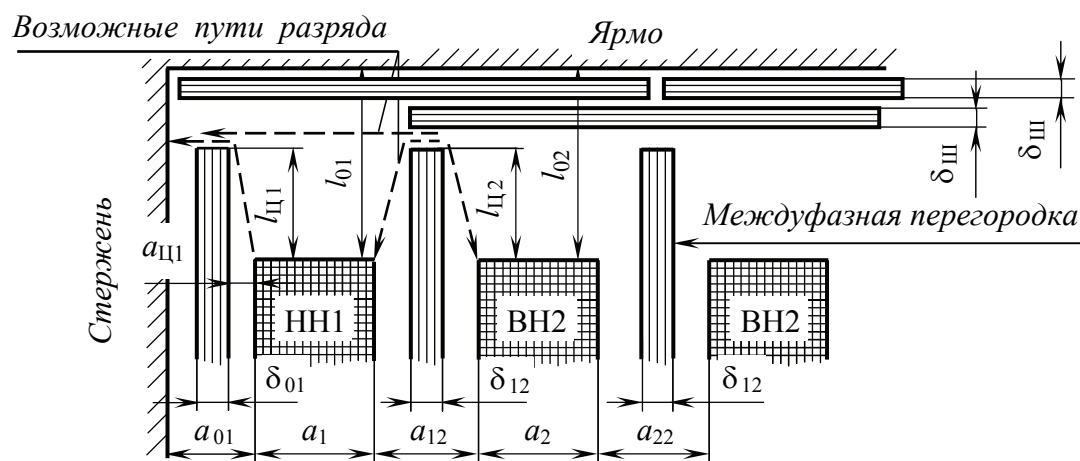


Рис. 2.9. Главная изоляция обмоток ВН и НН

При испытательном напряжении 85 кВ изоляцию обмоток от ядра усиливают шайбами из электрокартона. Между обмотками ВН на напряжение  $U_H \geq 15$  кВ устанавливают междуфазные перегородки из электрокартона.

Минимальные изоляционные расстояния и размеры основных деталей главной изоляции масляных трансформаторов для испытательных напряжений 5–85 кВ приведены для обмоток: НН – в табл. 2.7; ВН – в табл. 2.8.

Таблица 2.7

**Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН**

Мощность трансформатора $S_H$ , кВ·А	Испытательное напряжение НН, $U_{исп}$ , кВ	НН от ядра $l_{01}$ , мм	НН от стержня, мм			
			$\delta_{01}$	$a_{ц1}$	$a_{01}$	$l_{ц1}$
25 – 250	5	15	Картон 2×0,5	–	4	–
400 – 630	5	Принять равным $l_{02}$ для обмоток ВН по табл. 2.8	То же	–	5	–
100 – 630	5*		4	6	15	18
1000 – 2500	5		4	6	15	18
630 – 1600	18; 25 и 35		4	6	15	25
2500 – 6300	18; 25 и 35		4	8	17,5	25
630 и выше	45		5	10	20	30
630 и выше	55		5	13	23	45
Все мощности	85		6	19	30	70

Примечание: \*– для винтовых обмоток.

Таблица 2.8

**Минимальные изоляционные расстояния обмоток ВН**

Мощность трансформатора $S_H$ , кВ·А	Испытательное напряжение ВН, $U_{исп}$ , кВ	ВН от ярма, мм		Между ВН и НН, мм		Выступ цилиндра $l_{ц2}$ , мм	Между ВН и ВН, мм	
		$l_{02}$	$\delta_{ш}$	$a_{12}$	$\delta_{12}$		$a_{22}$	$\delta_{22}$
25 – 100	18; 25 и 35	20	–	9	2,5	10	8	–
160 – 630	18; 25 и 35	30	–	9	3	15	10	–
1000 – 6300	18; 25 и 35	50	–	20	4	20	18	–
630 и выше	45	50	2	20	4	20	18	2
630 и выше	55	50	2	20	5	30	20	3
160 – 630	85 (прим. 1)	75	2	27	5	50	20	3
1000 – 6300	85 (прим. 1)	75	2	27	5	50	30	3

*Примечания:* 1. Для цилиндрических обмоток с  $U_{исп} = 85$  кВ минимальное изоляционное расстояние  $a_{12} = 27$  мм; толщина электростатического экрана с изоляцией 3 мм. При расчётах принимать  $a_{12} = 30$  мм.

2. При наличии прессующих колец [1, 3–5] расстояние от верхнего ярма  $l_{02}$  принимать увеличенным на 45 мм против данных табл. 2.8. Расстояние до нижнего ярма по табл. 2.8.

Используя заданную номинальную мощность  $S_H$ , выбранные ранее испытательное напряжение  $U_{исп}$  и тип обмоток следует предварительно найти по табл. 2.7 и затем по табл. 2.8 размеры главной изоляции обмоток. Далее в процессе расчёта эти размеры могут быть скорректированы (обычно в сторону увеличения). Изоляцию соседних витков между собой, между слоями витков, между катушками одной обмотки называют *продольной* изоляцией обмотки. Устройство и размеры продольной изоляции приведены в главе 3.

**2.5. Определение диаметра стержня и высоты обмоток**

Диаметр  $d$  стержня магнитопровода зависит от мощности  $S_H$ , частоты  $f$ , индукции в стержне  $B_C$ , а также ряда других величин, определяемых ниже.

Ширина приведенного канала рассеяния, мм,

$$a_p = a_{12} + (a_1 + a_2)/3. \quad (2.10)$$

Здесь  $a_{12}$  – изоляционный промежуток между обмотками ВН и НН, мм (рис. 2.9) определяют по табл. 2.8 для испытательного напряжения обмотки ВН; второе слагаемое – суммарный приведенный радиальный размер (приведенная ширина) обмоток ВН и НН, мм,

$$(a_1 + a_2)/3 \approx k \sqrt[4]{S'} \cdot 10, \quad (2.11)$$

где  $S'$  – мощность трансформатора на один стержень, кВ·А;  $k$  – коэффициент, определяемый по табл. 2.9 в зависимости от мощности, материала обмоток и напряжения обмотки ВН.

Таблица 2.9

**Коэффициент  $k$  для определения  
приведенной ширины обмоток трансформаторов ПБВ**

Материал обмоток	Медь		Алюминий	
мощность трансформатора $S_H$ , кВ·А	класс напряжения (обмотки ВН), кВ			
	6 и 10	35 (20)	6 и 10	35 (20)
До 250	0,63	0,65–0,58	0,79	0,81–0,73
400 – 630	0,53	0,65–0,58	0,66	0,81–0,73
1000 – 6300	0,51–0,43	0,52–0,48	0,64–0,54	0,65–0,6

*Примечание:* Для трансформаторов с РПН значения  $k$  из таблицы умножить на 1,1.

Коэффициент  $\beta$  характеризует отношение средней длины окружности канала между обмотками  $\pi d_{12}$  к высоте обмотки  $l$  (рис. 2.1)

$$\beta = \pi d_{12} / l. \quad (2.12)$$

В формуле (2.12)  $d_{12}$  и  $l$  измерены в одинаковых единицах измерения.

Значения  $\beta$  для трехфазных двухобмоточных трансформаторов классов напряжения 6–35 кВ с магнитопроводами из сталей марок 3404, 3405 при толщине листов 0,35; 0,3 мм и индукциях  $B_C = (1,6–1,65)$  Тл даны в табл. 2.10.

Таблица 2.10

**Рекомендуемые значения  $\beta$**

Материал обмоток	Медь		Алюминий	
мощность трансформатора $S_H$ , кВ·А	класс напряжения (обмотки ВН), кВ			
	6 и 10	35 (20)	6 и 10	35 (20)
25 – 100	1,8–2,4	–	1,2–1,6	–
160 – 630	1,8–2,4	1,8–2,4	1,2–1,6	1,2–1,5
1000 – 6300	2,0–2,6	1,8–2,4	1,3–1,7	1,2–1,6

Рекомендуемые значения  $\beta$  позволяют проектировать трансформаторы с заданными потерями, напряжением короткого замыкания, устойчивые к коротким замыканиям, с минимальной стоимостью активных материалов.

Диаметр стержня предварительно, м,

$$d = 0,0902 \sqrt[4]{\frac{S' a_p \beta k_p}{f u_p B_C^2 k_C^2}}. \quad (2.13)$$

Здесь  $S'$  – мощность трансформатора на один стержень, кВ·А;  $a_p$  – ширина приведенного канала рассеяния по формуле (2.10), мм;  $k_p \approx 0,95$  коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному;  $f$  – частота, Гц;  $u_p$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %;  $B_C$  – индукция в стержне, Тл;  $k_C$  – коэффициент заполнения сталью площади круга.

Найденный по (2.13) диаметр  $d$  следует сравнить со значениями диаметров в табл. 2.2. Если диаметр  $d$  выходит за границы табличных значений более чем на (5-7) %, следует проверить исходные данные, повторить расчет  $d$  по (2.13), изменить, при необходимости, в нужную сторону диаметр стержня  $d$ , варьируя принятые значения входящих в формулу величин.

После чего следует выбрать ближайший к  $d$  диаметр  $d_H$  по шкале нормализованных диаметров  $d_H$ , м: 0,08; 0,085; 0,09; 0,095; 0,1; 0,105; 0,11; 0,115; 0,12; 0,125; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,2; 0,21; 0,22; 0,23; 0,24; 0,25; 0,26; 0,27; 0,28; 0,29; 0,3; 0,31; 0,32; 0,33; 0,34; 0,35; 0,36; 0,37; 0,38; 0,39; 0,4; 0,42; 0,45; 0,48 и определить коэффициент  $\beta_H$ , соответствующий выбранному нормализованному диаметру  $d_H$ ,

$$\beta_H = \beta (d_H / d)^4. \quad (2.14)$$

Значение  $\beta_H$  должно находиться в пределах, указанных в табл. 2.10.

В противном случае следует, варьируя в небольших пределах коэффициент  $\beta$ , индукцию  $B_C$  в (2.13) и диаметр стержня  $d_H$  в (2.14), добиться попадания  $\beta_H$  в допустимые границы, заданные в табл. 2.10.

Средний диаметр канала между обмотками предварительно, м,

$$d_{12} = d_H + (2a_{01} + 2a_1 + a_{12}) \cdot 10^{-3}. \quad (2.15)$$

Здесь  $d_H$  – нормализованный диаметр, м;  $a_{01}$  и  $a_{12}$  – минимальные изоляционные промежутки (рис. 2.11) по табл. 2.7 и 2.8 соответственно, мм; радиальный размер обмотки НН (рис. 2.11) предварительно, мм,

$$a_1 = k k_1 \sqrt[4]{S'} \cdot 10. \quad (2.16)$$

Здесь мощность на стержень  $S'$ , кВ·А, определена по формуле (2.1); коэффициент  $k$  по табл. 2.9; коэффициент  $k_1 = 1,1$  для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А включительно, при больших мощностях  $k_1 = 1,4$ .

Высота обмоток предварительно, м,

$$l = \pi d_{12} / \beta_H. \quad (2.17)$$

Активное сечение стержня (чистое сечение стали), м<sup>2</sup>,

$$P_C = k_C \frac{\pi d_H^2}{4} \quad (2.18)$$

При окончательном расчёте магнитной системы сечение стержня  $P_C$  может быть скорректировано на 0,5–3,0 %. В процессе расчёта обмоток и магнитной системы предварительно найденные размеры могут быть уточнены и изменены.

Поэтому при окончательном определении потерь мощности и напряжения короткого замыкания, электромагнитных сил и нагрева обмоток при коротком замыкании, потерь мощности и тока холостого хода, а также при тепловом расчете трансформатора следует использовать реальные размеры обмоток и магнитопровода, определяемые в главах 3 и 5.

## 3. РАСЧЕТ ОБМОТОК НН И ВН

### 3.1. Общие сведения

Основным элементом всех обмоток является виток. Электродвижущая сила (напряжение) одного витка,  $U_B$ ,

$$U_B = 4,44 f B_C P_C, \quad (3.1)$$

где  $B_C$ , Тл, определяется по табл. 2.3;  $P_C$  – по формуле (2.18), м<sup>2</sup>;  $f = 50$  Гц.

В зависимости от тока нагрузки виток выполняют одним проводом (рис. 3.1, а, в) или группой параллельных проводов круглого (рис. 3.1, б) или прямоугольного (рис. 3.1, г, д, е) сечения.

Количество проводов выбирают исходя из сечения витка, сортамента провода (табл. 2.4, 2.5) и технологии намотки катушек: провод большого сечения трудно укладывать, а излишнее количество параллельных проводов увеличивает объем изоляции проводников и размеры обмотки. Вследствие этого увеличивается расход провода, стали магнитопровода и общая стоимость трансформатора.

Ряд витков, намотанных на цилиндрическую поверхность, называют слоем. Группу последовательно соединенных витков, конструктивно объединенных и отделенных от других таких же групп, называют катушкой. Обмотка может состоять из одной, двух или нескольких катушек.

Во всех типах обмоток намотку выполняют (рис. 3.2) либо параллельно оси стержня (осевое направление), либо вдоль любого радиуса (радиальное направление).

Провод прямоугольного сечения наматывают плашмя (рис. 3.3, а) или на ребро (рис. 3.3, б). В первом случае больший размер провода  $b$  располагают в осевом направлении, во втором – в радиальном. Намотка на ребро менее технологична и увеличивает добавочные потери в обмотке. Поэтому рекомендуется избегать намотки на ребро, а в случае ее применения использовать провод с соотношением поперечного сечения  $1,3 < b / a < 3,0$ . Намотку на ребро по соображениям рационального размещения провода используют в одно-двухслойных обмотках из провода прямоугольного сечения.

Между обмотками, катушками, слоями или витками делают каналы – осевые и радиальные – для охлаждения и изоляции. Осевые каналы формируют деревянными рейками, радиальные – установкой изоляционных прокладок (рис. 3.2). Установка шайб, цилиндров, перегородок из электрокартона улучшает изоляцию обмоток.

Размеры охлаждающих каналов, провода и катушек обмотки зависят от нагрева, характеризуемого плотностью теплового потока  $q$ , равной от-

ношению потерь в обмотке к площади поверхности охлаждения. По условиям допустимого нагрева принимают  $q$  не более  $1400 \text{ Вт/м}^2$  для обмоток из медного и на (20–25) % меньше для обмоток из алюминиевого провода.

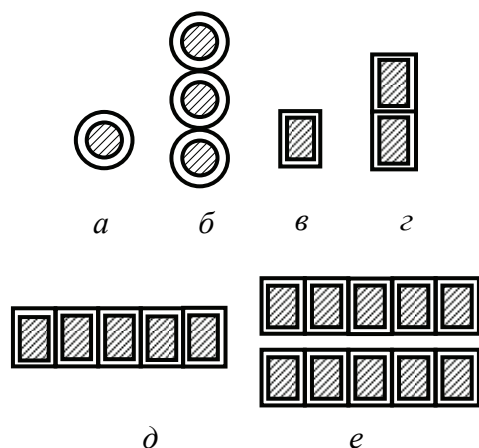


Рис. 3.1. Сечение витка

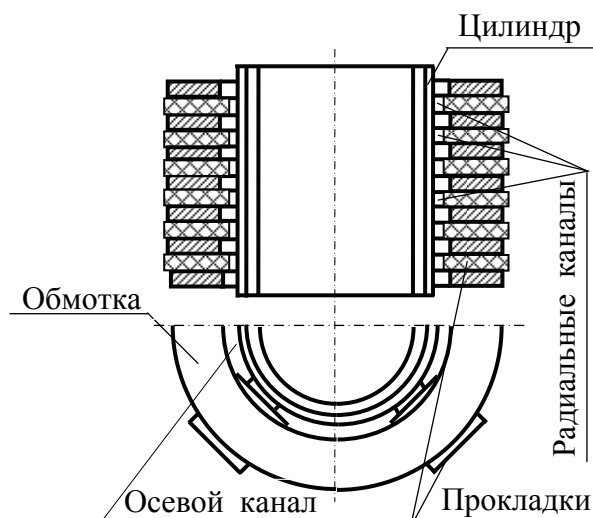


Рис. 3.2. Радиальные и осевые каналы

Тип обмотки (ее конструкцию) выбирают по ее электрическим величинам: заданной мощности трансформатора  $S_H$ , току нагрузки одного стержня  $I_C$  и номинальному напряжению, а также по поперечному сечению витка обмотки П.

Температурный режим трансформатора во многом определяется плотностью тока в его обмотках. Плотность тока зависит от заданных величин: номинальной мощности  $S_H$ , потерь короткого замыкания  $P_K$  и определенных в начале расчета диаметра канала  $d_{12}$  и напряжения витка  $u_B$ .

Средняя плотность тока в обмотках,  $\text{А/мм}^2$ ,

$$J_{\text{CP}} = C_1 k_d \frac{P_K u_B}{S_H d_{12}} \cdot 10^{-2}. \quad (3.2)$$

Здесь коэффициент  $C_1 = 0,746$  для обмоток из медного и  $C_1 = 0,463$  для обмоток из алюминиевого провода;  $k_d$  – коэффициент, учитывающий добавочные потери (табл. 3.1);  $P_K$  – потери короткого замыкания, Вт;  $u_B$  – напряжение одного витка по формуле (3.1), В;  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;  $d_{12}$  – по формуле (2.15), м;

Значение  $J_{\text{CP}}$  должно быть в пределах, указанных в табл. 3.2, и уточняется после выбора площади сечения провода обмоток НН и ВН. Уточненные значения плотности тока не должны отличаться от ее среднего значения более чем на 5 – 10 %.

Таблица 3.1

Значение коэффициента  $k_D$ 

Коэффициент	Мощность $S_H$ , кВт·А		
	25–100	160–630	1000–6300
$k_D$	0,97	0,96–0,93	0,93–0,85

Таблица 3.2

Средняя плотность тока в обмотках  $J_{CP}$ , А/мм<sup>2</sup>

Мощность $S_H$ , кВт·А	25–630	1000–6300	10000–16000
Медный провод	1,8–3,5	2,2–3,5	2,0–3,5
Алюминиевый провод	1,1–2,5	1,5–2,6	1,5–2,7

Ориентировочное сечение витка каждой обмотки, мм<sup>2</sup>,

$$\Pi = \frac{I_\Phi}{J_{CP}}, \quad (3.3)$$

где  $I_\Phi$  – фазный ток соответствующей обмотки.

Необходимое число проводов и их сечение подбирают по табл. 2.4, 2.5 исходя из ориентировочного сечения витка  $\Pi$ , конструктивных особенностей обмотки и условий ее охлаждения.

Размер провода в радиальном направлении ограничен допустимой величиной добавочных потерь в обмотках от магнитных потоков рассеяния и зависит от числа проводов обмотки в радиальном направлении. Выбранный радиальный размер провода должен быть меньше предельного по табл. 3.3. При этом добавочные потери не превысят 5 % от основных электрических потерь в обмотке.

Таблица 3.3

## Предельные радиальные размеры провода для цилиндрических обмоток

Материал обмотки	Число слоев (проводов) в радиальном направлении									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Радиальный размер провода $a_{RAD}$ , мм									
Медь	9,0	6,3	5,3	4,5	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0
Алюминий	11,8	8,0	6,7	5,6	5,0	4,8	4,5	4,0	3,8	3,8

В винтовых и катушечных обмотках с радиальными каналами индукция поля рассеяния существенно ниже, чем в обмотках без радиальных каналов. Поэтому размер провода в таких обмотках может быть принят на 15–25 % выше приведенного в табл. 3.3.



Сечение провода или группы параллельных проводов следует выбрать близким к предварительно рассчитанному по формуле (3.3) сечению витка П.

У расположенных ближе к стержню обмоток НН условия охлаждения хуже, чем у наружных обмоток ВН, внешняя поверхность которых свободно обтекается маслом. Для уменьшения потерь мощности и нагрева обмотки НН можно увеличить на 3–7 % реальное сечение витка  $\Pi_1$ , что на столько же уменьшит плотность тока  $J_1$  в обмотке НН по сравнению с найденными по формулам (3.2), (3.3).

Ниже приведены методики расчета различных типов обмоток НН и ВН, соответствующие их «главному» применению (табл. 2.6). В конце каждого пункта расчета конкретного типа обмотки приведены изменения, которые следует произвести в методиках расчета обмоток для случая их «возможного» (по табл. 2.5) применения.

## 3.2. Расчёт обмоток НН

### 3.2.1. Общие вычисления для любого типа обмоток

Расчет обмоток трансформатора начинают с обмотки низшего напряжения, располагаемой между стержнем и обмоткой ВН.

Число витков одной фазы обмотки НН:

$$w_1 = \frac{U_{\Phi 1}}{4,44 f B_C \Pi_C}, \quad (3.4)$$

где  $U_{\Phi 1}$  – номинальное фазное напряжение обмотки НН, В;  $f$  – частота напряжения сети, равная 50 Гц;  $B_C$  – индукция в стержне, Тл, по табл. 2.2;  $\Pi_C$  – площадь сечения стержня по формуле (2.18), м<sup>2</sup>.

Полученное значение  $w_1$  округляют до ближайшего целого числа, находят напряжение (ЭДС) одного витка, В,

$$u_B = \frac{U_{\Phi 1}}{w_1} \quad (3.5)$$

и действительную индукцию в стержне, Тл,

$$B_C = \frac{u_B}{4,44 f \Pi_C}. \quad (3.6)$$

Дальнейший расчет зависит от выбранного по табл. 2.6 типа обмотки НН.

### 3.2.2. Расчет двухслойной цилиндрической обмотки из провода прямоугольного сечения

Число витков в одном слое двухслойной обмотки (может быть дробным):

$$w_{c1} = \frac{w_1}{2} . \quad (3.7)$$

Осевой размер витка, мм,

$$h_{B1} = \frac{l_1}{w_{c1} + 1} \cdot 10^3 . \quad (3.8)$$

Здесь высота обмотки  $l_1 = (l - 0,01)$ , где  $l$ , м, определяется по формуле (2.18).

По расчетному значению  $h_{B1}$ , предварительно найденному по формуле (3.8), сечению витка  $\Pi_1$  и сортаменту обмоточного провода (табл. 2.5) подбирают провода прямоугольного сечения.

В двухслойной обмотке больший размер провода  $b$  при намотке на ребро (рис. 3.3, б) ограничен условиями охлаждения и добавочными потерями от полей рассеяния. Обычно принимают  $b \leq 7,1$  мм для медного провода и  $b \leq 8,6$  мм – для алюминиевого.

С целью уменьшения добавочных потерь рекомендуется вести намотку провода плашмя (рис. 3.3, а). Число параллельных проводов при намотке плашмя не должно быть больше 4–6. Все параллельные провода имеют одинаковые размеры поперечного сечения и укладываются один за другим в осевом направлении. Иногда для возможности выполнения обмотки высотой  $l$ , полученной по формуле (2.17), намотку выполняют на ребро. В этом случае в осевом направлении принимают размер  $a$ , а в радиальном –  $b$ . Параллельные провода витка укладывают в осевом направлении (рис. 3.3, б).

Выбранный радиальный размер  $a$  или  $b$  провода (рис. 3.3) не должен превышать размер  $a_{\text{РАД}}$  в табл. 3.3. При этом добавочные потери мощности в проводниках обмотки от магнитных потоков рассеяния не превзойдут 5 % от основных электрических потерь.

Выбранные размеры проводов следует записать по форме:

$$\text{марка провода} \times n_{B1} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} ,$$

где  $a$  и  $b$  – размеры провода без изоляции, мм;  $a'$  и  $b'$  – размеры провода в изоляции, мм;  $n_{B1}$  – число параллельных проводов витка.

Размеры провода в изоляции, мм,

$$\begin{aligned} a' &= a + 2\delta, \\ b' &= b + 2\delta. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Таблица 3.4

## Размер охлаждающих каналов

Вертикальные каналы				Горизонтальные каналы	
Длина канала или обмотки $l$ , мм	Обмотка-обмотка, мм	Обмотка-цилиндр, мм	Обмотка-стержень, мм	Длина канала, мм	Обмотка-обмотка, мм
До 300	4–5	4	4–5	До 40	4
300–500	5–6	5	5–6	40–60	5
500–1000	6–8	5–6	6–8	60–70	6
1000–1500	8–10	6–8	8–10	70–80	7

В формулах (3.9)  $a$  и  $b$  – размеры провода, мм;  $2\delta$  – расчетная толщина изоляции на две стороны, мм, принимаемая по табл. 2.5 (размер в скобках).

Полное сечение витка из  $n_{\text{В1}}$  параллельных проводов, мм<sup>2</sup>,

$$\Pi_1 = n_{\text{В1}} \Pi_{\text{ПР}}, \quad (3.10)$$

где  $\Pi_{\text{ПР}}$  – сечение одного провода по табл. 2.5, мм<sup>2</sup>.

Реальная плотность тока в обмотке НН, А/мм<sup>2</sup>,

$$J_1 = \frac{I_{\Phi 1}}{\Pi_1}. \quad (3.11)$$

Рассчитанные по реальным размерам провода сечение витка  $\Pi_1$  и плотность тока  $J_1$  должны быть близки к предварительно найденным по формулам (3.2), (3.3).

Осевой размер (высота) витка, мм,

$$h_{\text{В1}} = n_{\text{В1}} h_{\text{ПР}}. \quad (3.12)$$

Здесь  $n_{\text{В1}}$  – число параллельных проводов;  $h_{\text{ПР}}$  – высота одного проводника в изоляции, мм; при намотке плашмя  $h_{\text{ПР}} = b'$ , при намотке на ребро  $h_{\text{ПР}} = a'$ , где  $a'$  и  $b'$  – размеры провода в изоляции, мм.

Осевой размер обмотки НН, м,

$$l_1 = [h_{\text{В1}}(w_{\text{С1}} + 1) + 10] \cdot 10^{-3}. \quad (3.13)$$

Здесь  $h_{\text{В1}}$  – высота витка, мм;  $w_{\text{С1}}$  – число витков в слое обмотки.

Двухслойную цилиндрическую обмотку выполняют с охлаждающим каналом между слоями или без него. Радиальный размер обмотки (рис. 3.4), мм,

$$a_1 = 2b_{\text{ПР}} + a_{11}. \quad (3.14)$$

Здесь  $b_{\text{ПР}}$  – действительный радиальный размер провода в одном слое, мм;  $b_{\text{ПР}} = a'$  при намотке плашмя и  $b_{\text{ПР}} = b'$  при намотке на ребро, где

$a'$  и  $b'$  – размеры провода прямоугольного сечения в изоляции, мм. Минимальный размер охлаждающего канала  $a_{11}$  в мм выбирают из столбца «обмотка-обмотка» графы «вертикальные каналы» в табл. 3.4, принимая длину канала равной длине обмотки  $l_1$ . Если  $b_{\text{ПР}} \leq 3,6$  мм для медного или  $b_{\text{ПР}} \leq 4,3$  мм для алюминиевого провода, то охлаждающий канал между слоями может быть заменен жесткой междуслойной изоляцией – двумя слоями электроизоляционного картона толщиной 0,5 мм. При отсутствии канала размер  $a_{11}$  принимают равным толщине междуслойной изоляции 1,0 мм.

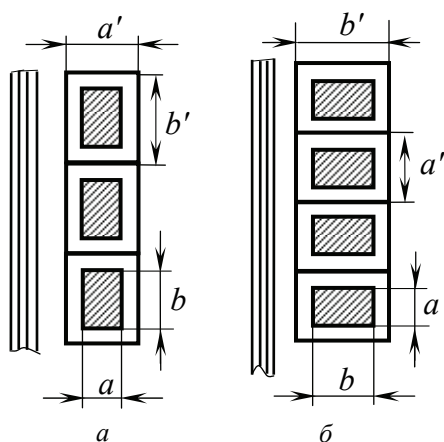


Рис. 3.3. Способы укладки проводов:  
а – намотка плашмя; б – намотка на ребро

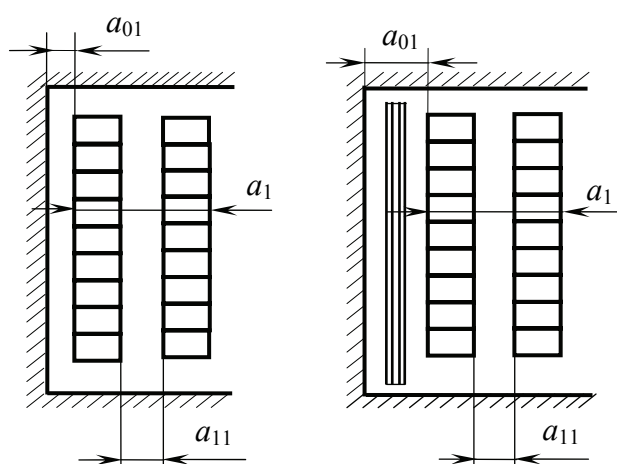


Рис. 3.4. Радиальные размеры обмотки

Внутренний диаметр обмотки, м,

$$D'_1 = d_{\text{H}} + 2 a_{01} \cdot 10^{-3}, \quad (3.15)$$

где  $d_{\text{H}}$  – нормализованный диаметр стержня, м;  $a_{01}$  – расстояние между обмоткой и стержнем по табл. 2.7, мм.

Наружный диаметр обмотки, м,

$$D''_1 = D'_1 + 2 a_1 \cdot 10^{-3}, \quad (3.16)$$

где  $D'_1$  – внутренний диаметр обмотки, м;  $a_1$  – радиальный размер обмотки, мм.

Полная поверхность охлаждения обмотки НН,  $\text{м}^2$ ,

$$\Pi_{01} = 0,75 K \pi (D'_1 + D''_1) l_1. \quad (3.17)$$

Здесь коэффициент  $K = 6$ , если между слоями обмотки есть охлаждающий канал, и  $K = 3$ , если канал отсутствует; все линейные размеры в м.

После определения потерь короткого замыкания в обмотке НН (глава 4) следует найти плотность теплового потока на поверхности обмотки,  $\text{Вт/м}^2$ ,

$$q_1 = \frac{P_{\text{осн1}} k_{\text{д1}}}{\Pi_{01}}, \quad (3.18)$$

где  $P_{\text{осн1}}$  – основные потери в обмотке НН определяются по формуле (4.5), Вт;  $k_{\text{д1}}$  – коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотке НН от полей рассеяния по формуле (4.11).

Полученное значение  $q_1$  не должно превышать  $800\text{--}1000 \text{ Вт/м}^2$  при медном проводе обмотки и  $600\text{--}800 \text{ Вт/м}^2$  при алюминиевом.

### 3.2.3. Расчет винтовой обмотки

Винтовую обмотку выполняют только из провода прямоугольного сечения. В одноходовой винтовой обмотке витки располагают один за другим в осевом направлении по винтовой линии. Сечение витка состоит из сечений нескольких параллельных проводов, намотанных плашмя в один ряд (рис. 3.5, а) в радиальном направлении обмотки.

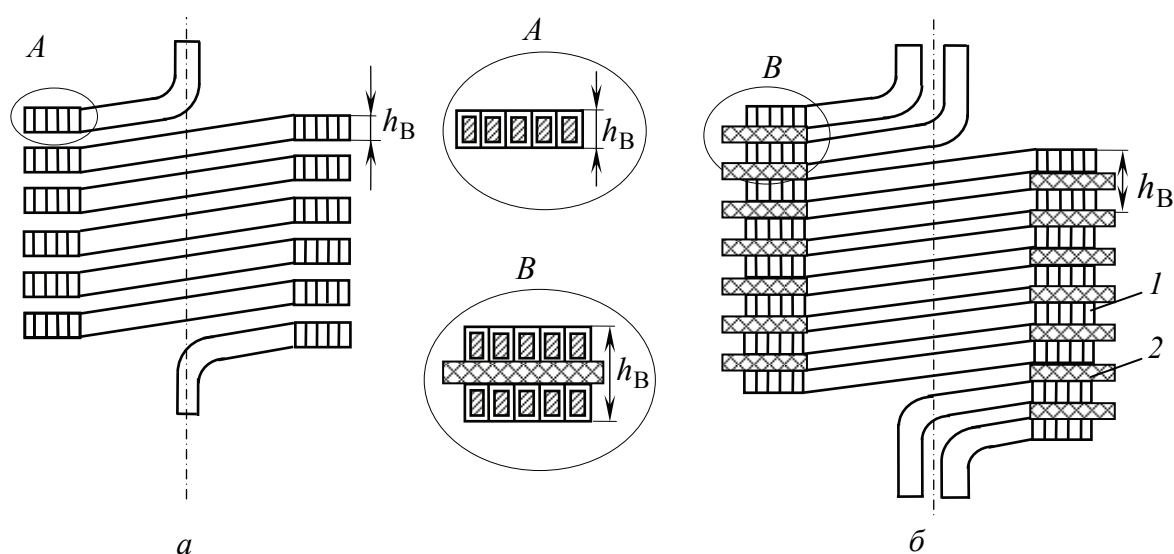


Рис. 3.5. Винтовая обмотка: а – сечение одноходовой обмотки; б – сечение двухходовой обмотки

Если сечение витка велико и число проводов витка значительно, параллельные провода витка делят на две группы, или хода, которые образуют двухходовую обмотку (рис. 3.5, б). В редких случаях, например в трехфазных трансформаторах мощностью  $1600 \text{ кВ}\cdot\text{А}$  при напряжении НН  $0,4 \text{ кВ}$  и фазном токе обмотки  $2300 \text{ А}$ , может быть применена четырехходовая обмотка.

Обычно витки обмоток разделяют радиальными каналами (рис. 3.6, а, б), служащими для лучшего охлаждения обмотки и повышения ее электрической прочности. В сечении обмотки на рис. 3.5, б показаны распорные прокладки 2, образующие радиальные каналы между витками 1 винтовой обмотки. За счет прокладок увеличивают механическую прочность обмотки. В двухходовой обмотке каналы выполняют между двумя группами проводов (рис. 3.6, в), заменяя каналы в некоторых случаях прокладками или выполняя их через два витка или два хода (рис. 3.6, г) или же обмотку наматывают без каналов, так, чтобы виток плотно прилегал к витку (рис. 3.6, з).

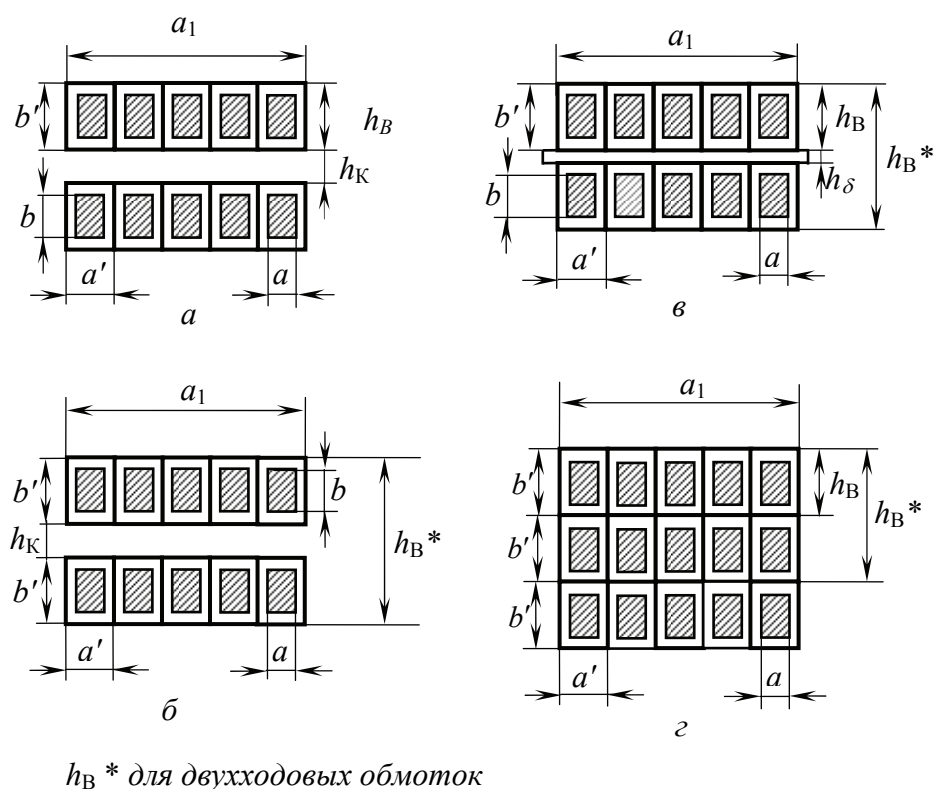


Рис. 3.6. Сечение витка винтовой обмотки

Выбор числа ходов обмотки зависит от осевого размера (высоты) одного витка, мм, определяемого сначала для одноходовой обмотки (рис. 3.6, а) с учетом транспозиции:

$$h_{B1} = \frac{l_1 \cdot 10^3}{w_1 + 4} - h_{K1}. \quad (3.19)$$

Здесь высота обмотки  $l_1$  равна предварительно найденной по формуле (2.17) длине  $l$ , м;  $h_{K1}$  – осевой размер охлаждающего канала между витками, мм. Обычно  $h_{K1} = 0,1a_1$ , но не менее 4 мм. Размер  $a_1$ , мм, определяют по формуле (2.16).

Максимально возможный осевой размер витка одноходовой обмотки равен максимальному размеру обмоточного провода (табл. 2.5) в изоляции, т. е. не может превышать 16,5 мм для медного и 18,5 мм для алюминиевого провода. Если полученная по формуле (3.19) высота витка  $h_{\text{В1}}$  больше указанных значений, то необходимо применить двухходовую обмотку. Осевой размер витка двухходовой обмотки с радиальными каналами (рис. 3.6, б), мм,

$$h_{\text{В1}} = \frac{l_1 \cdot 10^3}{w_1 + 1} - h_{\text{К1}}; \quad (3.20)$$

обозначения и размерность величин те же, что и в формуле (3.19).

Осевой размер витка двухходовой обмотки составляет от 16,5 до 45 мм. При  $h_{\text{В1}} \geq (35-45)$  мм используют четырехходовую обмотку.

Ориентировочное сечение витка  $\Pi_1$  находят по формуле (3.3). Минимальное число параллельных проводов в одноходовой обмотке – четыре, в двухходовой – восемь, в четырехходовой – шестнадцать. Все параллельные провода имеют одинаковые размеры и площадь поперечного сечения. Сечение провода выбирают с учетом возможности размещения его по высоте витка и охлаждения обмотки при допустимом уровне добавочных потерь. В обмотках с радиальными охлаждающими каналами между всеми витками и ходами значение большего из двух размеров провода прямоугольного сечения  $b$ , мм:

– для одноходовой обмотки

$$b \leq h_{\text{В1}} - 2\delta; \quad (3.21)$$

– для двухходовой и четырехходовой обмоток

$$b \leq [h_{\text{В1}} - (n_{\text{Х}} - 1) h_{\text{К1}}] / n_{\text{Х}} - 2\delta, \quad (3.22)$$

где  $h_{\text{К1}}$  – осевой размер охлаждающего канала, мм;  $n_{\text{Х}}$  – число ходов обмотки, в двухходовой  $n_{\text{Х}} = 2$ , в четырехходовой  $n_{\text{Х}} = 4$ ;  $2\delta$  – двусторонняя толщина изоляции провода, мм, определяется по табл. 2.5.

По условиям охлаждения при допустимом уровне добавочных потерь размер провода  $b$ , мм,

$$b \leq \frac{k_3 q}{k_2 J_{\text{СР}}^2}. \quad (3.23)$$

Здесь  $k_3$  – коэффициент, учитывающий закрытие изоляционными деталями части охлаждаемой поверхности обмотки; для винтовых обмоток  $k_3 = 1,0$ ;  $q$  – плотность теплового потока не должна превышать  $1400 \text{ Вт/м}^2$ ; числовой коэффициент  $k_2 = 10,7$  для медного и  $k_2 = 17,2$  для алюминиевого провода;  $J_{\text{СР}}$  – плотность тока в обмотке, определенная по формуле (3.2),  $\text{А/мм}^2$ .

Если вычисленный по формуле (3.23) размер  $b$  превышает допустимые значения, определенные по формулам (3.21) и (3.22), в два и более раз, то в одноходовой обмотке делают радиальные каналы через два витка, а в двухходовой не делают каналы между ходами (рис. 3.6, в). В этих случаях канал между витками или ходами заменяют изоляционной прокладкой толщиной  $2 \times 0,5$  мм.

Винтовые обмотки иногда выполняют без каналов с плотным прилеганием витков и ходов, если плотность тока в медном проводе обмотки не превышает  $2,5 \text{ А/мм}^2$ , а в алюминиевом –  $1,8 \text{ А/мм}^2$ . Высоту витка такой обмотки определяют по формулам (3.19) или (3.20) при  $h_{к1} = 0$ .

Радиальный размер  $a_1$  обмотки (рис. 3.6), мм,

$$a_1 = a' n_{В1} / n_X ; \quad (3.24)$$

где  $a'$  – меньший размер провода в изоляции, мм;  $n_{В1}$  – число параллельных проводов витка;  $n_X$  – число ходов обмотки: в одноходовой  $n_X = 1$ , в двухходовой  $n_X = 2$ , в четырехходовой  $n_X = 4$ .

Предельное значение радиального размера обмотки определяют из условия охлаждения, мм,

$$a_{\text{пр}} \leq \frac{k_3 q}{k_2 J_{\text{ср}}^2} , \quad (3.25)$$

Здесь  $k_3 = 0,8$  – коэффициент, учитывающий закрытие изоляционными деталями части охлаждаемой поверхности обмотки; плотность теплового потока  $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ ; коэффициент  $k_2 = 10,7$  для медного и  $k_2 = 17,2$  для алюминиевого провода;  $J_{\text{ср}}$  – плотность тока в обмотке, определенная по формуле (3.2),  $\text{А/мм}^2$ .

Радиальный размер провода  $a$  и число  $n_{В1}$  параллельных проводов обмотки выбирают так, чтобы общий радиальный размер ее  $a_1$ , вычисленный по формуле (3.24), не превышал предельного значения  $a_{\text{пр}}$ , вычисленного по формуле (3.25). При этом радиальный размер провода без изоляции  $a$ , мм, должен быть меньше допустимого  $a_{\text{доп}}$ , зависящего от числа параллельных проводов в одном ходе обмотки. Размер  $a_{\text{доп}}$  определен из условия, что добавочные потери в обмотке не превысят допустимых 5 % от основных электрических потерь. Для винтовых обмоток с радиальными каналами между ходами и витками  $a_{\text{доп}} = (1,15–1,25) a_{\text{рад}}$ . Для обмоток без радиальных каналов с плотным прилеганием витков  $a_{\text{доп}} = a_{\text{рад}}$ . Допустимый радиальный размер провода  $a_{\text{рад}}$  следует определить по табл. 3.3 исходя из числа проводов в одном ходе обмотки.

Подобранные размеры проводов следует записать в виде

$$\text{марка провода} \times n_{В1} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} ,$$



где  $n_{B1}$  – число параллельных проводов витка;  $a, b$  – размеры провода без изоляции, мм, определяют по табл. 2.5;  $a', b'$  – размеры провода в изоляции по формуле (3.9), мм.

Полное сечение витка обмотки, мм<sup>2</sup>,

$$\Pi_1 = n_{B1} \Pi_{\text{пр}}, \quad (3.26)$$

где  $\Pi_{\text{пр}}$  – сечение одного провода, принятое по табл. 2.5, мм<sup>2</sup>.

Реальная плотность тока в обмотке, А/мм<sup>2</sup>,

$$J_1 = \frac{I_{\Phi 1}}{\Pi_1}. \quad (3.27)$$

Осевой размер (высоту)  $l_1$ , м, опрессованной после сушки трансформатора обмотки, определяют по следующим формулам:

– для одноходовой обмотки с радиальными каналами (рис. 3.6, а)

$$l_1 = [b'(w_1 + 4) + k h_{K1}(w_1 + 3)] \cdot 10^{-3}; \quad (3.28)$$

– одноходовой обмотки с каналами через два витка (рис. 3.6, в)

$$l_1 = \{ b'(w_1 + 4) + k [h_{K1}(\frac{w_1}{2} + 2) + h_{\delta} \frac{w_1}{2}] \} \cdot 10^{-3}; \quad (3.29)$$

– двухходовой обмотки с радиальными каналами (рис. 3.6, б)

$$l_1 = \{ 2b'(w_1 + 1) + k h_{K1}(2w_1 + 1) \} \cdot 10^{-3}; \quad (3.30)$$

– двухходовой обмотки без канала между ходами (рис. 3.6, г)

$$l_1 = \{ 2b'(w_1 + 1) + k [h_{K1} w_1 + h_{\delta}(w_1 + 1)] \} \cdot 10^{-3}; \quad (3.31)$$

– четырехходовой обмотки с каналами между ходами и витками

$$l_1 = \{ 4b'(w_1 + 1) + k h_{K1}(4w_1 + 3) \} \cdot 10^{-3}; \quad (3.32)$$

– четырехходовой обмотки с каналами через два хода

$$l_1 = \{ 4b'(w_1 + 1) + k [h_{K1}(2w_1 + 1) + 2h_{\delta}(w_1 + 1)] \} \cdot 10^{-3}. \quad (3.32a)$$

В формулах (3.28)–(3.32, а) коэффициент  $k = (0,94–0,96)$  учитывает усадку межкатушечных прокладок после сушки и опрессовки обмотки,  $h_{\delta} = (1–1,5)$  мм – толщина прокладок; все размеры в мм.

Осевой размер обмоток без радиальных каналов с плотным прилеганием проводов (рис. 3.6, в) можно найти по формулам (3.28), (3.30) и (3.32), приняв  $h_{K1} = 0$ .

Осевой размер винтовой обмотки  $l_1$  сверить с предварительно определенным по формуле (2.17). При разнице размеров более (5–7) % принять другой размер провода по табл. 2.5 и повторить расчет.

Радиальный размер обмотки (рис. 3.6), мм,  $a_1 = a' n_{B1} / n_X$ , где  $a'$  – размер провода в изоляции определяется по формулам (3.9), мм;  $n_{B1}$  – число параллельных проводов витка;  $n_X$  – число ходов обмотки, в одноходовой  $n_X = 1$ , в двухходовой  $n_X = 2$ , в четырехходовой  $n_X = 4$ .

Внутренний диаметр обмотки, м,

$$D'_1 = d_H + 2a_{01} \cdot 10^{-3}, \quad (3.33)$$

где  $d_H$  – нормализованный диаметр стержня, м;  $a_{01}$  – ширина канала между обмоткой и стержнем (табл. 2.7), мм.

Наружный диаметр обмотки, м,

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1 \cdot 10^{-3}, \quad (3.34)$$

где  $a_1$  – радиальный размер обмотки, мм; внутренний диаметр  $D'_1$ , м.

Плотность теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, на поверхности: обмотки с радиальными каналами между всеми витками

$$q = \frac{k J_1 I_{\Phi 1} w_K k_D}{k_3 (b' + a_1)}, \quad (3.35)$$

одноходовой обмотки с каналом через два витка, двухходовой обмотки без канала между ходами и четырехходовой с каналами через два хода

$$q = \frac{k_1 J_1 I_{\Phi 1} w_K k_D}{k_3 (2b' + a_1)}, \quad (3.36)$$

обмотки без радиальных каналов с плотным прилеганием проводов

$$q = \frac{k n_{B1}}{k_3 n_X} b \frac{a}{a'} J_1^2 k_D. \quad (3.37)$$

Здесь коэффициент  $k = 10,7$  для медного и  $k = 17,2$  – для алюминиевого провода; коэффициент  $k_1 = 21,4$  для медного провода и  $k_1 = 34,4$  – для алюминиевого;  $J_1$  – реальная плотность тока в обмотке НН, А/мм<sup>2</sup>;  $I_{\Phi 1}$  – фазный ток обмотки НН, А; число витков в одном ходе обмотки  $w_K = 1$  для одноходовой обмотки,  $w_K = 0,5$  – для двухходовой и  $w_K = 0,25$  для четырехходовой;  $k_D$  – коэффициент, учитывающий добавочные потери ( $k_D = 1,05$ );  $k_3$  – коэффициент, учитывающий закрытие охлаждаемой поверхности обмотки изоляционными деталями ( $k_3 = 0,75$ );  $a$  и  $b$  – размеры провода без изоляции, мм;  $a'$  и  $b'$  – размеры провода в изоляции по формулам (3.9), мм;  $a_1$  – радиальный размер обмотки, мм;  $n_{B1}$  – число параллельных проводов витка;  $n_X$  – число ходов обмотки.

Полученное значение  $q$  не должно превышать 1400 Вт/м<sup>2</sup> для обмоток из медного провода и 1100 Вт/м<sup>2</sup> – из алюминиевого.

### 3.3. Расчет обмоток ВН

#### 3.3.1. Общие вычисления для всех типов обмоток

При проектировании обмоток ВН следует учесть выполнение ответвлений для регулирования напряжения. Для предлагаемых в задании на проектирование габаритов масляных трансформаторов ГОСТ 16110–82 предусмотрено регулирование напряжения без возбуждения (ПВВ) после отключения всех обмоток трансформатора от сети. Согласно ГОСТ 11920–85 предусмотрено пять ответвлений на +5; +2,5; 0; –2,5; –5 % от номинального напряжения. Переключение ответвлений обмоток производят специальными переключателями.

Наиболее часто применяемые схемы выполнения регулировочных ответвлений приведены на рис. 3.7.

Схему регулировочных ответвлений выбирают по мощности и номинальному напряжению трансформатора с учетом типа и схемы соединения обмотки ВН (табл. 2.6).

Схему рис. 3.7, *а* применяют для регулирования напряжения в трансформаторах мощностью до 160 кВ·А с многослойной цилиндрической обмоткой.

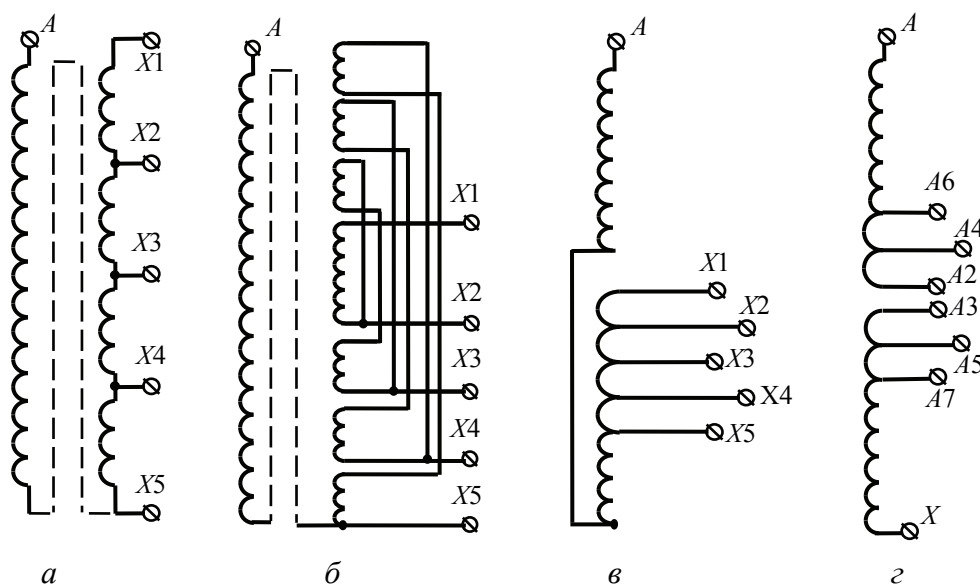


Рис. 3.7. Схемы регулировочных ответвлений в обмотке ВН при регулировании напряжения без возбуждения

При больших мощностях механические силы, действующие на отдельные витки при коротком замыкании трансформатора, могут быть опасными, и регулировочные витки обмотки ВН рекомендуется размещать в наружном слое обмотки симметрично относительно середины ее высоты,

например по схеме рис. 3.7, б. В непрерывной катушечной обмотке на напряжение до 35 кВ регулировочные катушки размещают в конце фазы по схеме рис. 3.7, в. Схема рис. 3.7, г с регулировочными катушками в середине обмотки применима для непрерывных катушечных обмоток на напряжение от 3 до 220 кВ. При соединении обмотки ВН в «треугольник» схему регулирования по рис. 3.7, в не применяют.

Число витков обмотки ВН при номинальном напряжении

$$w_{2H} = w_1 \frac{U_{\Phi 2}}{U_{\Phi 1}}, \quad (3.38)$$

где  $U_{\Phi 1}$  и  $U_{\Phi 2}$  – номинальные фазные напряжения обмоток НН и ВН.

Число витков на одной ступени регулирования

$$w_p = \frac{2,5 \% U_{\Phi 2}}{100 \% u_B}, \quad (3.39)$$

где  $u_B$  – напряжение одного витка обмотки, В, по формуле (3.5).

Число витков обмотки на ответвлениях +5; +2,5; 0; –2,5; –5 % от номинального напряжения соответственно равно  $w_{2H} + 2 w_p$ ;

$$w_{2H} + w_p; w_{2H}; w_{2H} - w_p; w_{2H} - 2 w_p.$$

Предварительно плотность тока в обмотке ВН, А/мм<sup>2</sup>,

$$J_2 = 2 J_{CP} - J_1, \quad (3.40)$$

где  $J_{CP}$  и  $J_1$  находят соответственно по формулам (3.2) и (3.11), (3.27).

Сечение витка обмотки ВН, мм<sup>2</sup>,

$$P_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{J_2}, \quad (3.41)$$

где  $I_{\Phi 2}$  – номинальный фазный ток обмотки ВН, А.

Входные витки (катушки) обмотки ВН с номинальным напряжением 20 кВ и выше выполняют с усиленной изоляцией, предотвращающей пробой изоляции между витками при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений.

У непрерывной катушечной обмотки в конце и начале каждой фазы устанавливают входные катушки с усиленной изоляцией. Для таких катушек изоляцию провода принимают по табл. 3.5.

Для повышения электрической прочности многослойных цилиндрических обмоток из провода круглого и прямоугольного сечения применяют междуслойную изоляцию из кабельной бумаги толщиной 0,12 мм. Число слоев кабельной бумаги между двумя слоями витков определяют по суммарному рабочему напряжению двух слоев обмотки (табл. 3.6).

Высоту междуслойной изоляции для увеличения пути разряда по поверхности между слоями делают больше высоты слоя витков.

Таблица 3.5

**Изоляция витков входных катушек катушечных обмоток**

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Изоляция витков $2\delta$ , мм, входных катушек	
		первая	вторая
20	55	0,96 (1,06)	1,35 (1,5)
35	85	1,35 (1,5)	

*Примечания:* 1. В скобках указана расчетная толщина изоляции.

2. При номинальных напряжениях 20 и 35 кВ два крайних канала между катушками вверху и внизу обмотки не менее 7 мм каждый.

Таблица 3.6

**Междуслойная изоляция многослойных цилиндрических обмоток**

Суммарное рабочее напряжение двух слоев обмотки, В	Число слоев кабельной бумаги	Толщина между- слойной изоляции $\delta_c$ , мм	Выступ междуслойной изо- ляции на торцах обмотки (на одну сторону), мм
До 1000	2	0,24	10
1001–2000	3	0,36	16
2001–3000	4	0,48	16
3001–3500	5	0,60	16
3501–4000	6	0,72	22
4001–4500	7	0,84	22
4501–5000	8	0,96	22
5001–5500	9	1,08	22

*Примечание.* В таблице приведены данные для трансформатора мощностью до 630 кВ·А включительно. При мощности от 1 000 кВ·А и выше междуслойную изоляцию принимают по этой же таблице, но  $\delta_c$  не менее 0,48 мм; выступ изоляции не менее 20 мм.

Для защиты от импульсных перенапряжений в многослойных цилиндрических обмотках классов напряжения 20 и 35 кВ применяют электрические экраны (рис. 3.8).

Экран представляет собой незамкнутый цилиндр из алюминиевого листа толщиной  $\delta_{\text{ЭКР}} = 0,5$  мм, устанавливаемый под внутренним слоем обмотки. Экран изолируют от внутреннего слоя обмотки обычной междуслойной изоляцией и электрически соединяют с линейным концом, подведенным к внутреннему слою обмотки.

### **3.3.2. Расчёт многослойной цилиндрической обмотки из провода круглого сечения**

В трансформаторах мощностью до 630 кВ·А часто применяют многослойные цилиндрические обмотки из медного или алюминиевого провода круглого сечения. Особенности устройства обмотки изложены в главе 2.

При расчете обмотки ВН (особенности расчета обмотки НН изложены после расчета обмотки ВН) по ориентировочному сечению витка  $\Pi_2$  и сортаменту провода (табл. 2.4) выбирают провод подходящего сечения или два – три одинаковых параллельных провода с диаметром без изоляции  $d_2$  и в изоляции  $d'_2$ , мм (рис. 3.8). Размеры провода следует записать так:

$$\text{марка провода} \times n_{B2} \times \frac{d_2}{d'_2},$$

где  $n_{B2}$  – число параллельных проводов.

Полное сечение витка, мм<sup>2</sup>,

$$\Pi_2 = \Pi_{\text{пр}} n_{B2}, \quad (3.42)$$

где  $\Pi_{\text{пр}}$  – сечение одного провода по табл. 2.4, мм<sup>2</sup>.

Реальная плотность тока, А/мм<sup>2</sup>,

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{\Pi_2}, \quad (3.43)$$

где  $I_{\Phi 2}$  – номинальный фазный ток обмотки ВН, А.

Число витков в слое

$$w_{C2} = \frac{l_2 \cdot 10^3}{n_{B2} d'_2} - 1, \quad (3.44)$$

Здесь  $l_2 = (l_1 - 0,01)$ , где  $l_1$  – высота обмотки НН, м, определяемая для двухслойных цилиндрических обмоток по формуле (3.13), для винтовых обмоток НН по формулам (3.28)–(3.32, а);  $n_{B2}$  – число параллельных проводов витка; диаметр провода в изоляции  $d'_2$ , мм.

Число слоев в обмотке

$$n_{C2} = \frac{w_{2H} + 2 w_P}{w_{C2}}, \quad (3.45)$$

где число витков  $w_{2H}$  и  $w_{2P}$  определяют по формулам (3.38), (3.39).

Полученное значение  $n_{C2}$  округляют до ближайшего большего числа.

Рабочее напряжение двух слоев, В,

$$U_{C2} = 2 w_{C2} u_B, \quad (3.46)$$

где  $u_B$  – напряжение одного витка по формуле (3.5), В.

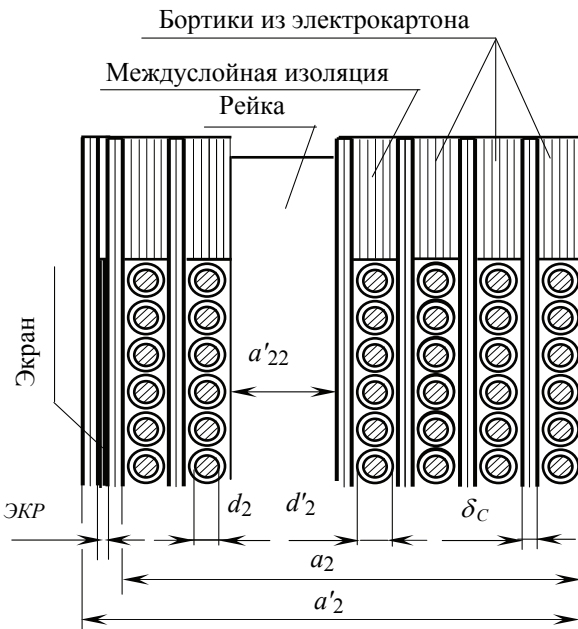


Рис. 3.8. Фрагмент цилиндрической обмотки

В соответствии с рабочим напряжением двух слоев по табл. 3.6 выбирают число слоев и общую толщину кабельной бумаги между слоями обмотки.

Для улучшения охлаждения обмотку выполняют в виде двух концентрических катушек с осевым масляным каналом между ними (рис. 3.8). Число слоев внутренней катушки при этом принимают не более  $1/3-2/5$  от общего числа слоев обмотки. Минимальную ширину вертикального масляного канала  $a'_{22}$  выбирают из столбца «обмотка-обмотка» графы «Вертикальные каналы» в табл. 3.4, приняв длину канала равной высоте обмотки  $l_2$ .

Радиальный размер обмотки без экрана (рис. 3.8), мм,

$$a_2 = d'_2 n_{C2} + \delta_C (n_{C2} - 1) + a'_{22}, \quad (3.47)$$

где  $d'_2$  – диаметр провода в изоляции, мм;  $\delta_C$  – толщина междуслойной изоляции по табл. 3.6, мм.

Радиальный размер обмотки с экраном (рис. 3.8), мм,

$$a'_2 = a_2 + \delta_{ЭКР} + 2 \delta_C. \quad (3.48)$$

Здесь толщина электрического экрана  $\delta_{ЭКР} = 0,5$  мм; толщина междуслойной изоляции  $\delta_C$  по табл. 3.6, мм.

Минимальный радиальный размер  $a_{12}$  осевого канала между обмотками НН и ВН и толщину  $\delta_{12}$  изоляционного цилиндра (рис. 2.9) выбирают по испытательному напряжению обмотки ВН из табл. 2.8.

Внутренний диаметр обмотки м,

$$D'_2 = D'_1 + 2 a_{12} \cdot 10^{-3}, \quad (3.49)$$

где  $D'_1$  – наружный диаметр обмотки НН, м.

Наружный диаметр обмотки, м,

– без экрана

$$D''_2 = D'_2 + 2 a_2 \cdot 10^{-3}; \quad (3.50)$$

– с экраном

$$D''_2 = D'_2 + 2 a'_2 \cdot 10^{-3}. \quad (3.51)$$

Размеры  $a_{12}, a_2, a'_2$  в формулах (3.49)–(3.51) указаны в мм.

Расстояние между обмотками ВН соседних стержней  $a_{22}$  (рис. 2.9) находят по табл. 2.8.

Поверхность охлаждения обмотки, разделенной на две катушки вертикальным охлаждающим каналом (рис. 3.8), м<sup>2</sup>,

$$\Pi_{02} = k k_3 \pi (D'_2 + D''_2) l_2. \quad (3.52)$$

Если первая катушка обмотки намотана непосредственно на изоляционный цилиндр, то  $k = 4,5$  и  $k_3 = 0,83$ ; если на рейки, расположенные на изоляционном цилиндре, то  $k = 6,0$  и  $k_3 = 0,8$ ; в (3.52) все размеры в м.

После определения потерь короткого замыкания для обмотки ВН (глава 4) следует найти плотность теплового потока,  $\text{Вт/м}^2$ ,

$$q = \frac{P_{\text{осн2}}}{\Pi_{02}} k_{\text{д2}}, \quad (3.53)$$

где  $P_{\text{осн2}}$  – потери в обмотке ВН по формуле (4.6), Вт;  $k_{\text{д2}}$  – коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотке ВН, по формуле (4.12).

Полученное значение  $q$  не должно превышать  $1\,000 \text{ Вт/м}^2$  для обмоток из медного провода и  $800 \text{ Вт/м}^2$  – из алюминиевого.

*Особенности расчета обмотки НН.* При расчете цилиндрической обмотки НН следует принять  $w_p = 0$ . Индекс «2» в обозначениях величин и формулах заменить на «1». Внутренний и наружный диаметры обмотки следует рассчитывать по формулам (3.15), (3.16) или (3.33), (3.34) вместо формул (3.49) – (3.51). Высоту обмотки в формуле (3.44) принять равной предварительно найденной по формуле (2.17) высоте  $l$ , м. Плотность теплового потока рассчитать по формулам (3.17) и (3.18).

### **3.3.3. Расчет многослойной цилиндрической обмотки из провода прямоугольного сечения**

Для трансформаторов мощностью 630 кВ·А и более в качестве обмоток ВН и НН на напряжения 10 и 35 кВ применяют многослойную цилиндрическую обмотку из провода прямоугольного сечения. Особенности устройства обмотки изложены в главе 2. Там же показана необходимость выполнения вертикальных каналов.

Определив предварительно плотность тока  $J_2$  и сечение витка  $\Pi_2$  по формулам (3.40) и (3.41), выбирают по табл. 2.5 один или два-три параллельных провода прямоугольного сечения с общим сечением близким к  $\Pi_2$ .

Суммарный радиальный размер проводов обмотки, необходимый для получения полного сечения всех витков обмотки ВН, мм,

$$a_1 = \frac{\Pi_2 (w_{2\text{Н}} + 2 w_p)}{k_{\text{ос}} l_2} \cdot 10^{-3}. \quad (3.54)$$

Здесь  $\Pi_2$  – сечение витка,  $\text{мм}^2$ ; число витков  $w_{2\text{Н}}$  и  $w_p$  вычисляют по формулам (3.38) и (3.39);  $k_{\text{ос}} \approx 0,93$  – коэффициент, учитывающий изоляцию проводов в осевом направлении обмотки; высота обмотки ВН, м,  $l_2 = (l_1 - 0,01)$ , где  $l_1$  – высота обмотки НН, м, определяемая для одно- и



двухслойных цилиндрических обмоток НН по формуле (3.13), для винтовых обмоток НН – по формулам (3.28)–(3.32, а);

Предельно допустимый радиальный размер обмотки по условиям охлаждения, мм,

$$a_1 = \frac{k_3 q}{k J_2^2} . \quad (3.55)$$

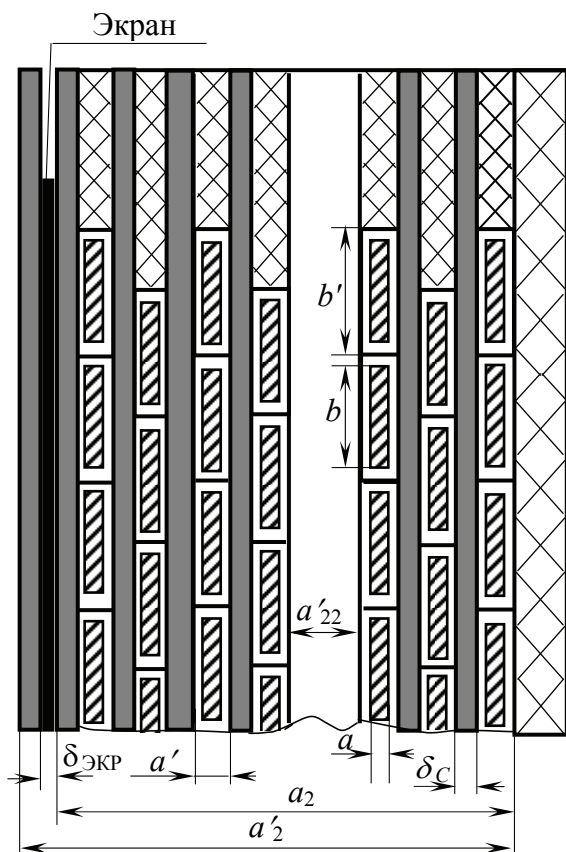


Рис. 3.9. Фрагмент обмотки из провода прямоугольного сечения

Здесь  $k_3$  – коэффициент закрытия поверхности, равный 0,8;  $q$  – предельная плотность теплового потока не более  $1400 \text{ Вт/м}^2$ ; коэффициент  $k = 10,7$  для медного провода;  $k = 17,2$  – для алюминиевого;  $J_2$  – плотность тока в обмотке, вычисленная по формуле (3.40).

Если размер  $a_1$ , вычисленный по формуле (3.54), окажется больше, чем  $a_1$ , вычисленный по формуле (3.55), то обмотку следует разделить на две или три concentрические катушки так, чтобы у каждой из них радиальный размер был не больше предельно допустимого по формуле (3.55). Ширина осевого канала между concentрическими катушками (рис. 3.9)  $a'_{22} \approx 0,01 l_2$ , но не менее 5 мм.

Выбранные по табл. 2.5 реальные сечения проводов следует записать так:

$$\text{марка провода} \times n_{\text{В2}} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} ,$$

где  $n_{\text{В2}}$  – число параллельных проводов витка;  $a$  и  $b$  – размеры проводов без изоляции, мм;  $a'$  и  $b'$  – размеры проводов в изоляции по формуле (3.9), мм.

Реальное сечение витка,  $\text{мм}^2$ ,

$$\Pi_2 = n_{\text{В2}} \Pi_{\text{ПР}} , \quad (3.56)$$

где  $\Pi_{\text{ПР}}$  – сечение одного провода,  $\text{мм}^2$ .

Реальное сечение витка  $\Pi_2$  не должно отличаться от первоначально вычисленного по формуле (3.41) более чем на 5–10 %.

Реальная плотность тока в обмотке,  $\text{А/мм}^2$ ,

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{\Pi_2}, \quad (3.57)$$

Здесь  $I_{\Phi 2}$  – номинальный фазный ток в обмотке ВН, А;  $\Pi_2$ ,  $\text{мм}^2$ .

Число витков в слое

$$w_{C2} = \frac{l_2 \cdot 10^3}{n_{B2} b'} - 1, \quad (3.58)$$

Здесь  $l_2$  – длина обмотки ВН, м;  $n_{B2}$  – число параллельных проводов витка;  $b'$  – размер провода в изоляции, мм.

Число слоев в обмотке

$$n_{C2} = \frac{w_{2H} + 2 w_P}{w_{C2}}, \quad (3.59)$$

где число витков  $w_{2H}$  и  $w_{2P}$  определяют по формулам (3.38), (3.39).

Значение  $n_{C2}$  округляют до ближайшего большего числа.

Размер  $a$  выбранного провода не должен быть больше значения  $a_{\text{РАД}}$  в табл. 3.3, зависящего от числа слоев  $n_{C2}$ . При этом добавочные потери в обмотке не превысят 5 % основных потерь.

Рабочее напряжение двух слоев обмотки, В,

$$U_{C2} = 2 w_{C2} u_B, \quad (3.60)$$

где  $w_{C2}$  – число витков в слое обмотки по формуле (3.58);  $u_B$  – напряжение витка, В, по формуле (3.5).

По рабочему напряжению двух слоев и данным табл. 3.6 выбирают число слоев и общую толщину  $\delta_C$  кабельной бумаги в изоляции между слоями обмотки.

Радиальный размер обмотки без экрана, мм,

$$a_2 = a' n_{C2} + \delta_C (n_{C2} - 1) + a'_{22} n_K. \quad (3.61)$$

Здесь размер провода  $a'$  и толщина изоляции  $\delta_C$  в мм;  $n_{C2}$  – число слоев;  $a'_{22} \approx 0,01 l_2$ , мм, но не менее 5 мм;  $n_K$  – число осевых каналов.

Для классов напряжения 20 и 35 кВ радиальный размер обмотки увеличивается за счет экрана и двух слоев междуслойной изоляции на 3 мм (рис. 3.9).

Радиальный размер обмотки с экраном, мм,

$$a'_2 = a_2 + 3,0, \quad (3.62)$$

в формуле (3.62) все размеры в мм.

Внутренний диаметр обмотки, м,

$$D_2' = D_1'' + 2 a_{12} \cdot 10^{-3}, \quad (3.63)$$

где  $D_1''$  – наружный диаметр обмотки НН, м;  $a_{12}$  – минимальный радиальный размер осевого канала (рис. 2.9) между обмотками НН и ВН, мм, выбирают по табл. 2.8;

Наружный диаметр обмотки, м:

– без экрана

$$D_2'' = D_2' + 2 a_2 \cdot 10^{-3}; \quad (3.64)$$

– с экраном

$$D_2'' = D_2' + 2 a_2' \cdot 10^{-3}, \quad (3.65)$$

где  $D_2'$  – внутренний диаметр обмотки, м;  $a_2, a_2'$  – радиальный размер обмотки, мм.

Поверхность охлаждения,  $\text{м}^2$ , определяют по формуле

$$\Pi_{02} = 3 k_3 n \pi (D_2' + D_2'') l_2, \quad (3.66)$$

где  $k_3$  – коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности обмотки изоляционными деталями ( $k_3 = 0,8$ );  $n$  – число концентрических катушек обмотки ВН; все размеры в м.

После определения потерь короткого замыкания для обмотки ВН (глава 4) следует найти плотность теплового потока,  $\text{Вт/м}^2$ ,

$$q = \frac{P_{\text{ОСН2}}}{\Pi_{02}} k_{\text{д2}}, \quad (3.67)$$

Здесь  $P_{\text{ОСН2}}$  – потери в обмотке ВН по формуле (4.6), Вт;  $k_{\text{д2}}$  – коэффициент, учитывающий добавочные потери, по формуле (4.11).

Полученное значение  $q$  не должно превышать  $1\,400 \text{ Вт/м}^2$  для обмоток из медного и  $1\,100 \text{ Вт/м}^2$  – из алюминиевого провода.

*Особенности расчета обмотки НН.* При расчете обмотки НН принять  $w_p = 0$ ,  $J_2 = J_{\text{ср}}$ . Индекс «2» в обозначениях величин и формулах заменить на «1». Внутренний и наружный диаметры обмотки следует рассчитывать по формулам (3.15), (3.16) или (3.33), (3.34) вместо формул (3.63), (3.64), (3.65). Высоту обмотки  $l_1$  в формулах (3.54), (3.58) принять равной предварительно найденной по формуле (2.17) высоте  $l$ , м. Плотность теплового потока рассчитать по формулам (3.17) и (3.18).

### 3.3.4. Расчет непрерывной катушечной обмотки

Катушечная обмотка состоит из расположенных в осевом направлении обмотки и последовательно соединенных катушек, намотанных в виде

плоских спиралей одним или несколькими параллельными проводами прямоугольного сечения (рис. 3.10).

Катушки разделены радиальными каналами, обеспечивающими изоляцию катушек и охлаждение обмотки. В обмотках трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А можно применять вдвоенные катушки с радиальными каналами через две. В этом случае половину радиальных каналов заменяют разрезными шайбами по две шайбы общей толщиной 1,0 мм. Этот прием наиболее часто используют для обмоток из алюминиевого провода. В трансформаторах мощностью на один стержень до 110 кВ·А допустимо вообще не делать межкатушечные каналы.

Катушечную обмотку называют непрерывной, если она намотана одним или несколькими (двумя-тремя) параллельными проводами без разрыва проводов. Витки для регулирования напряжения в обмотке ВН и витки с усиленной изоляцией располагают в отдельных катушках. Межкатушечные каналы образованы штампованными из электроизоляционного картона прокладками 4, как показано на рис. 3.11.

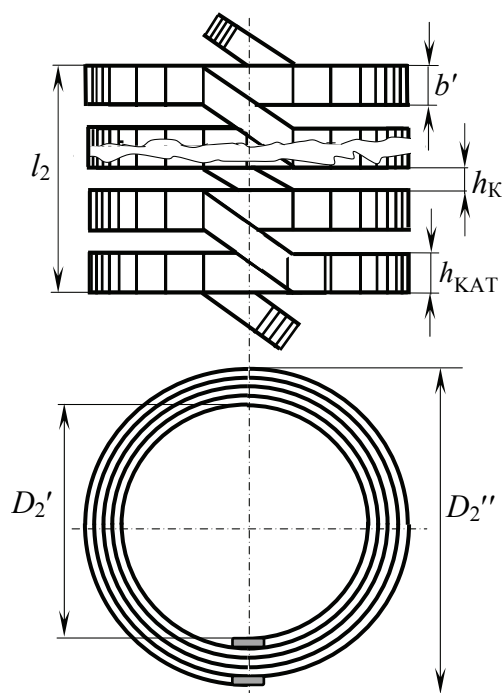


Рис. 3.10. Непрерывная катушечная обмотка

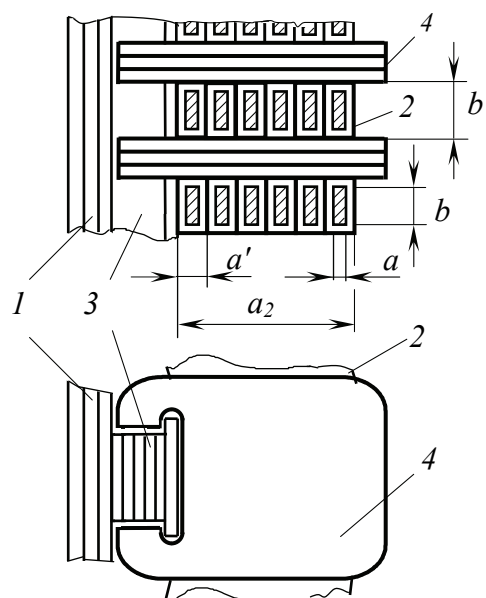


Рис. 3.11. Расположение катушек и межкатушечных прокладок

Прокладки закрепляют просечками на крайней широкой полосе рейки 3 (рис. 3.11) из электрокартона. Рейки устанавливают по образующим бумажно-бакелитового цилиндра 1, на котором наматывают обмотку 2. Ориентировочно число реек принимают по табл. 3.7.

Таблица 3.7

**Выбор числа реек**

Мощность трансформатора, кВ·А	Число реек
До 100	6
От 100 до 630	8
От 1000 до 1600	8–12
От 2500 до 10000	12–16

Переход провода из одной катушки в другую делают в промежутках между прокладками. Число витков в каждой катушке может быть как целым, так и дробным. В последнем случае в знаменателе дроби указывают полное число реек, в числителе число реек, охваченных неполным витком.

Катушки с разным числом витков – основные, регулировочные, с усиленной изоляцией – для удобства обозначают различными буквами алфавита (В, Г, Д соответственно).

Плотность тока  $J_2$  и ориентировочное сечение витка обмотки  $\Pi_2$  находят по формулам (3.40) и (3.41). К этому сечению витка по сортаменту (табл. 2.5) подбирают один или два-четыре параллельных провода одинакового сечения. Размер провода  $b$ , мм, по условиям охлаждения и допустимому уровню добавочных потерь не должен превышать значения, мм,

$$b_{\max} = \frac{k_3 q}{k J_2^2}, \quad (3.68)$$

где  $k_3$  – коэффициент закрытия поверхности, примерно равный 1,0;  $q$  – предельная плотность теплового потока не более 1 600 Вт/м<sup>2</sup>;  $k$  – числовой коэффициент;  $k = 10,7$  для медного и  $k = 17,2$  для алюминиевого провода;  $J_2$  – плотность тока в обмотке ВН, А/мм<sup>2</sup>

Если размер  $b_{\max}$  получается близким к предельному по сортаменту табл. 2.5 или выходит за эти пределы, то в катушечной обмотке можно выбрать действительный размер провода  $b \leq 0,5 b_{\max}$ , удвоить катушки и сделать радиальные масляные каналы через две катушки.

Обычно нужному сечению витка в сортаменте обмоточного провода соответствует несколько сечений с различным соотношением сторон  $a$  и  $b$ , что дает возможность широкого варьирования при размещении витков в катушке. Для получения более компактной конструкции обмотки рекомендуется выбирать из сортамента более крупные сечения при меньшем числе параллельных проводов с наибольшим возможным  $b \leq b_{\max}$ .

Число  $n_{B2}$  параллельных проводов витка и радиальный размер провода  $a$  без изоляции (рис. 3.11) выбирают так, чтобы размер  $a$  был меньше допустимого  $a_{\text{доп}}$ , зависящего от числа проводов в катушке (в радиальном направлении)  $n_{B2} \times w_{\text{осн}}$ , где  $w_{\text{осн}}$  определяют по формуле (3.75). Размер

$a_{\text{доп}}$  определен из условия, что добавочные потери в катушке от потоков рассеяния не превысят допустимых 5 % от основных электрических потерь. Для катушечных обмоток  $a_{\text{доп}} = (1,15-1,25)a_{\text{РАД}}$ . Предельный радиальный размер провода  $a_{\text{РАД}}$  для обмотки с радиальными каналами следует определить по табл. 3.3 исходя из числа проводов в катушке  $n_{\text{В2}} \times w_{\text{ОСН}}$ .

Выбранные размеры витка следует записать так:

$$\text{марка провода} \times n_{\text{В2}} \times \frac{a \times b}{a' \times b'},$$

где  $n_{\text{В2}}$  – число параллельных проводов витка;  $a$ ,  $b$  – размеры провода без изоляции, мм;  $a'$ ,  $b'$  – размеры провода в изоляции по формуле (3.9), мм.

Полное сечение витка,  $\text{мм}^2$ ,

$$\Pi_2 = n_{\text{В2}} \Pi_{\text{ПР}}, \quad (3.69)$$

где  $\Pi_{\text{ПР}}$  – принятое по табл. 2.5 сечение одного провода,  $\text{мм}^2$ .

Реальная плотность тока в обмотке,  $\text{А/мм}^2$ ,

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{\Pi_2}, \quad (3.70)$$

где  $I_{\Phi 2}$  – номинальный фазный ток обмотки ВН, А;  $\Pi_2$  – сечение витка,  $\text{мм}^2$ .

Высота катушки в этой обмотке, мм,

$$h_{\text{КАТ}} = b',$$

где  $b'$  – размер провода в изоляции по формуле (3.9), мм.

Число катушек на одном стержне для обмотки с каналами между всеми катушками ориентировочно

$$n_{\text{КАТ2}} = \frac{l_2 \cdot 10^3 + h_{\text{К}}}{h_{\text{КАТ}} + h_{\text{К}}}. \quad (3.71)$$

Для сдвоенных катушек с шайбами в двойных и с каналами между двойными катушками

$$n_{\text{КАТ2}} = \frac{2(l_2 \cdot 10^3 + h_{\text{К}})}{2h_{\text{КАТ}} + h_{\text{К}} + \delta_{\text{Ш}}}. \quad (3.72)$$

В формулах (3.71), (3.72)  $l_2 = l_1$ , где  $l_1$  – реальная длина обмотки НН по формулам (3.13) или (3.28) – (3.32а), м;  $h_{\text{К}} = (4-6)$  мм – осевой размер (высота) канала;  $\delta_{\text{Ш}} = 1,0$  мм – толщина заменяющих канал шайб.

Значение  $n_{\text{КАТ2}}$  округляют до ближайшего меньшего четного числа.

### Число витков в катушке

$$w_{\text{КАТ2}} = \frac{w_{2\text{Н}} + 2 w_{\text{Р}}}{n_{\text{КАТ2}}}, \quad (3.73)$$

где число витков  $w_{2\text{Н}}$  и  $w_{\text{Р}}$  определяют по формулам (3.38), (3.39).

Если число витков регулировочного ответвления  $w_{\text{Р}}$ , найденное по формуле (3.39), меньше или равно  $w_{\text{КАТ2}}$ , то для выполнения регулировочных ответвлений достаточно четырех регулировочных катушек (типа Г). Если  $w_{\text{Р}} \geq w_{\text{КАТ2}}$ , то число регулировочных катушек удваивают, а число витков в каждой из них принимают равным  $0,5 w_{\text{Р}}$  при условии, что  $0,5 w_{\text{Р}} \leq w_{\text{КАТ2}}$ .

В обмотке на напряжение 20 кВ выполняют с усиленной изоляцией две крайние катушки ( $n_{\text{УС}} = 2$ ), на напряжение 35 кВ – четыре ( $n_{\text{УС}} = 4$ ). Число витков в катушке с усиленной изоляцией (Д)

$$w_{\text{УС}} = (0,6 - 0,8) w_{\text{КАТ2}}. \quad (3.74)$$

Реальное число витков в основных катушках обмотки (типа В)

$$w_{\text{ОСН}} = \frac{(w_{2\text{Н}} - 2 w_{\text{Р}} - n_{\text{УС}} w_{\text{УС}})}{(n_{\text{КАТ2}} - n_{\text{Р}} - n_{\text{УС}})}, \quad (3.75)$$

где  $w_{2\text{Н}}$  и  $w_{\text{Р}}$  – число витков, определяемое по формулам (3.38), (3.39);  $n_{\text{Р}}$  – число регулировочных катушек (Г);  $n_{\text{УС}}$  – число катушек с усиленной изоляцией (Д).

Высота (осевой размер)  $l_2$ , м, обмотки с каналами между всеми катушками

$$l_2 = \{ b' n_{\text{КАТ2}} + k [h_{\text{К}} (n_{\text{КАТ2}} - 2) + h_{\text{КР}}] \} \cdot 10^{-3}; \quad (3.76)$$

с шайбами в двойных и с каналами между двойными катушками

$$l_2 = \{ b' n_{\text{КАТ2}} + k [h_{\text{К}} (\frac{n_{\text{КАТ2}}}{2} - 2) + h_{\text{КР}} + \frac{n_{\text{КАТ2}}}{2} \delta_{\text{Ш}}] \} \cdot 10^{-3}. \quad (3.77)$$

Здесь  $b'$  – размер провода в изоляции, мм;  $n_{\text{КАТ2}}$  – число катушек; коэффициент, учитывающий усадку обмотки после сушки и опрессовки  $k = 0,94 - 0,96$ ;  $h_{\text{КР}}$  – высота канала в месте разрыва обмотки и размещения регулировочных катушек, равная 8, 10, 12 мм для обмоток классов напряжения 6, 10, 35 (20) кВ; толщина шайб  $\delta_{\text{Ш}} = 1,0$  мм.

Полученная по формулам (3.76), (3.77) высота  $l_2$  обмотки ВН должна быть примерно равна высоте обмотки НН, т. е.  $l_2 \approx l_1$  (разница высот обмоток не более 5 мм).

Радиальный размер обмотки, мм,

$$a_2 = a' w_{\text{ОСН}} n_{\text{В2}}. \quad (3.78)$$

Здесь  $a'$  – размер провода в изоляции, мм;  $w_{\text{ОСН}}$  – число витков основной катушки (В), дополненное до ближайшего целого числа;  $n_{\text{В2}}$  – число параллельных проводов в витке.

Внутренний диаметр обмотки, м,

$$D'_2 = D''_1 + 2a_{12} \cdot 10^{-3}, \quad (3.79)$$

где  $D''_1$  – внешний диаметр обмотки НН, м;  $a_{12}$  – радиальный размер осевого канала между обмотками НН и ВН (рис. 2.3) по табл. 2.7, мм.

Наружный диаметр обмотки, м,

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2 \cdot 10^{-3}, \quad (3.80)$$

где  $a_2$  – радиальный размер обмотки, мм.

Плотность теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, обмотки: с каналами между всеми катушками

$$q = \frac{k_1 J_2 I_{\Phi 2} w_{\text{ОСН}} k_{\text{Д2}}}{k_3 (b' + a_2)}; \quad (3.81)$$

с шайбами в двойных и с каналами между двойными катушками

$$q = \frac{2 k_1 J_2 I_{\Phi 2} w_{\text{ОСН}} k_{\text{Д2}}}{k_3 (2b' + a_2)}. \quad (3.82)$$

Здесь  $k_1 = 10,7$  для медного провода обмоток,  $k_1 = 17,2$  – для алюминиевого провода;  $J_2$  – плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;  $I_{\Phi 2}$  – фазный ток обмотки ВН, А;  $w_{\text{ОСН}}$  – число витков в основных катушках; коэффициент, учитывающий добавочные потери  $k_{\text{Д2}} = 1,05$ ; коэффициент, учитывающий закрытие охлаждаемой поверхности катушки изоляционными деталями,  $k_3 = 0,75$ ;  $b'$  – размер провода в изоляции, мм;  $a_2$  – радиальный размер обмотки, мм;

По условиям нагрева обмотки значение теплового потока не должно превышать 1400 Вт/м<sup>2</sup> для обмоток из медного провода и 1100 Вт/м<sup>2</sup> для обмоток из алюминиевого провода.

*Особенности расчета обмотки НН.* При расчете непрерывной катушечной обмотки НН принять  $w_p = 0$ ,  $n_p = 0$ ,  $J_2 = J_{\text{ср}}$ . Индекс «2» в обозначениях величин и формулах заменить на «1». Внутренний и наружный диаметры обмотки следует рассчитывать по формулам (3.15), (3.16) или (3.33), (3.34) вместо формул (3.79), (3.80). Высоту обмотки в формулах (3.71), (3.72) принять равной предварительно найденной по формуле (2.17) высоте  $l$ , м. Плотность теплового потока рассчитать по формулам (3.81) и (3.82).



## 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

### 4.1. Определение потерь короткого замыкания

Потерями короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называют потери мощности при установлении в одной из обмоток тока, соответствующего номинальной мощности, и замкнутой накоротко другой обмотке трансформатора.

Потери короткого замыкания  $P_K$  в трансформаторе подразделяют на следующие составляющие:

- основные электрические потери  $P_{ОСН1}$  и  $P_{ОСН2}$ , обусловленные токами в обмотках НН и ВН;
- добавочные потери в обмотках НН и ВН от вихревых токов, индуктированных полем рассеяния;
- основные потери в отводах от обмоток  $P_{ОТВ1}$  и  $P_{ОТВ2}$ ;
- потери в стенках бака и других металлических деталях трансформатора, вызванные магнитным полем рассеяния обмоток,  $P_B$ .

Средний диаметр, м, обмоток НН и ВН соответственно:

$$D_{CP1} = \frac{D'_1 + D''_1}{2}; \quad (4.1)$$

$$D_{CP2} = \frac{D'_2 + D''_2}{2}, \quad (4.2)$$

где  $D'_1, D''_1, D'_2, D''_2$  – соответственно внутренние и наружные диаметры обмоток НН и ВН, м, найденные в главе 3.

Масса металла, кг, обмоток НН и ВН соответственно:

$$G_{01} = k D_{CP1} w_1 \Pi_1 \cdot 10^{-3}, \quad (4.3)$$

$$G_{02} = k D_{CP2} w_2 \Pi_2 \cdot 10^{-3}, \quad (4.4)$$

где  $k = 84$  для медного и  $k = 25,4$  для алюминиевого провода;  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  – сечения витков обмоток НН и ВН, мм<sup>2</sup>;  $D_{CP1}$  и  $D_{CP2}$  – средние диаметры обмоток, м.

Основные потери, Вт, в обмотках НН и ВН соответственно:

$$P_{ОСН1} = k J_1^2 G_{01}, \quad (4.5)$$

$$P_{ОСН2} = k J_2^2 G_{02}, \quad (4.6)$$

где  $k = 2,4$  для медного и  $k = 12,75$  для алюминиевого провода;  $J_1$  и  $J_2$  – реальная плотность тока,  $\text{А/мм}^2$ , в обмотках НН и ВН;  $G_{01}$  и  $G_{02}$  – массы металла обмоток НН и ВН, кг.

Масса металла обмотки ВН с учетом витков верхних ступеней регулирования, кг,

$$G_{02\Pi} = k D_{\text{CP2}} (w_{2\text{H}} + w_{\text{P}}) \Pi_2 \cdot 10^{-3}, \quad (4.7)$$

где обозначения и размерности те же, что и в формулах (4.3), (4.4).

Полная масса металла обмоток трансформатора, кг,

$$G_{\text{ОБ}} = G_{01} + G_{02\Pi}. \quad (4.8)$$

Для расчета добавочных потерь в обмотках НН и ВН от потока рассеяния  $\Phi_{\text{P}}$  (рис. 4.1) необходимо определить коэффициенты (для каждой обмотки), учитывающие заполнение высоты обмотки материалом провода:

– для обмоток из провода прямоугольного сечения

$$\beta_{\Pi} = \frac{b_{\Pi\text{P}} m}{l} k_{\text{P}} \cdot 10^{-3}; \quad (4.9)$$

– для обмоток из провода круглого сечения

$$\beta_{\text{K}} = \frac{d m}{l} k_{\text{P}} \cdot 10^{-3}. \quad (4.10)$$

В формулах (4.9) и (4.10)  $b_{\Pi\text{P}}$  – размер провода прямоугольного сечения в осевом направлении обмотки (рис. 4.1), мм;  $d$  – диаметр провода круглого сечения, мм;  $m$  – число проводников в осевом направлении обмотки (рис. 4.1);  $l$  – высота обмотки, м;  $k_{\text{P}} = 0,93 - 0,98$  – коэффициент приведения поля рассеяния.

Число проводников в осевом направлении (вдоль) обмотки  $m$  для цилиндрических обмоток равно произведению числа витков в слое на число параллельных проводников в витке  $m = n_{\text{B1}} \times w_{\text{C1}}$  или  $m = n_{\text{B2}} \times w_{\text{C2}}$ . В катушечной обмотке  $m = n_{\text{КАТ2}}$ . В винтовых обмотках  $m$  получают, перемножая число витков  $w_1$  на число ходов  $n_{\text{Х}}$  обмотки.

Для изолированного провода  $\beta_{\Pi}$  и  $\beta_{\text{K}}$  всегда меньше единицы.

Коэффициенты, учитывающие добавочные потери в обмотке НН  $k_{\text{Д1}}$  и в обмотке ВН  $k_{\text{Д2}}$ , рассчитывают по формулам:

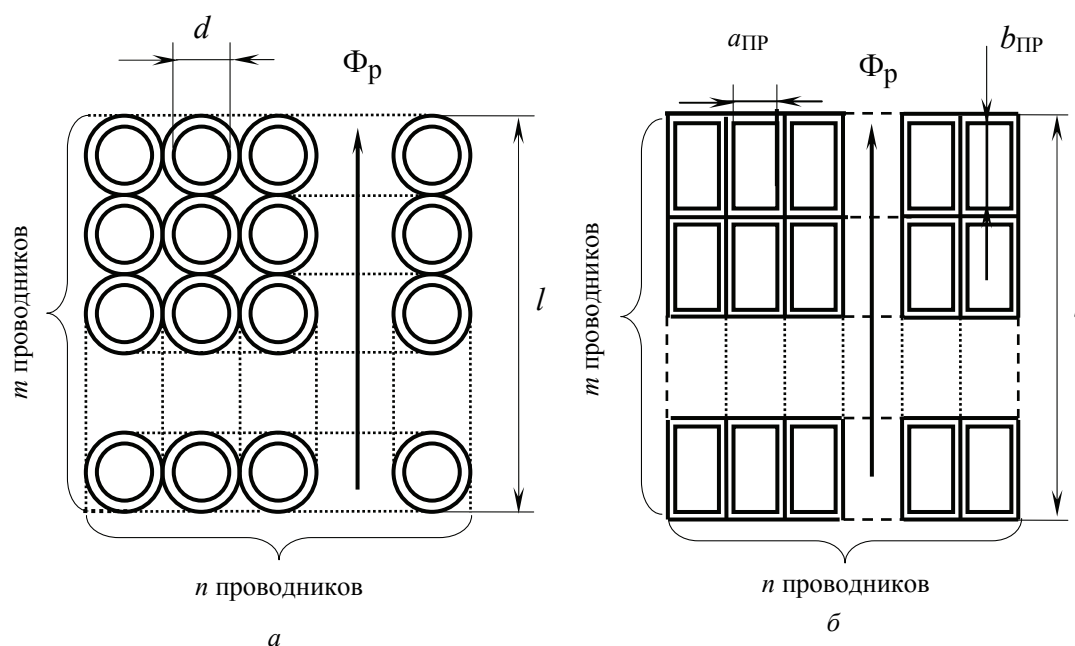
– для обмоток из провода прямоугольного сечения

$$k_{\text{Д}} = 1 + k \beta_{\Pi}^2 n^2 a_{\Pi\text{P}}^4 \cdot 10^{-4}, \quad (4.11)$$

– для обмоток из провода круглого сечения

$$k_{\text{Д}} = 1 + k_1 \beta_{\text{K}}^2 n^2 d^4 \cdot 10^{-4}. \quad (4.12)$$

Здесь коэффициент для проводов прямоугольного сечения из меди  $k = 0,095$ , из алюминия  $k = 0,037$ ; коэффициент для проводов круглого сечения из меди  $k_1 = 0,044$ , из алюминия  $k_1 = 0,017$ ; коэффициенты  $\beta_{\Pi}$  и  $\beta_K$  по формулам (4.9) и (4.10);  $a_{\Pi P}$  – размер провода прямоугольного сечения в радиальном направлении (поперек) обмотки на рис. 4.1, мм;  $d$  – диаметр провода круглого сечения, мм;  $n$  – число проводников в радиальном направлении (поперек) обмотки (рис. 4.1).



Стрелкой показано направление линий потока рассеяния  $\Phi_p$

Рис. 4.1. К определению добавочных потерь в обмотках:

$a$  – провод круглого сечения;  $b$  – провод прямоугольного сечения

Число  $n$  равно: числу слоев  $n_{C1}$  или  $n_{C2}$  в цилиндрических обмотках; числу параллельных проводов в одном ходе в винтовых обмотках  $n_{B1}/n_X$ ; произведению числа витков катушки на число параллельных проводов в витке для катушечных обмоток  $w_{OCH} \times n_{B2}$ .

Для расчета основных потерь в отводах обмоток НН и ВН определяют длины проводников и массы металла отводов. Сечение отвода  $\Pi_{OVB}$  обмотки НН или ВН равно сечению витка соответствующей обмотки.

Общая длина отводов, м, для соединения обмоток в «звезду»

$$l_{OVB} \approx 7,5 \cdot l \quad (4.13)$$

и для соединения в «треугольник»

$$l_{OVB} \approx 14 \cdot l, \quad (4.14)$$

где  $l$  – длина соответствующей обмотки, определяемая в главе 3, м.

Масса металла отводов обмотки НН или ВН, кг,

$$G_{\text{отв}} = l_{\text{отв}} \Pi_{\text{отв}} \gamma \cdot 10^{-6}. \quad (4.15)$$

Здесь длина отводов  $l_{\text{отв}}$  в м; сечение  $\Pi_{\text{отв}}$ , мм<sup>2</sup>; плотность материала обмоток  $\gamma = 8\,900$  кг/м<sup>3</sup> для меди и  $\gamma = 2\,700$  кг/м<sup>3</sup> для алюминия.

Основные потери, Вт, соответственно в отводах НН и ВН:

$$P_{\text{отв1}} = k J_1^2 G_{\text{отв1}}, \quad (4.16)$$

$$P_{\text{отв2}} = k J_2^2 G_{\text{отв2}}. \quad (4.17)$$

Здесь  $k = 2,4$  для медных и  $k = 12,75$  для алюминиевых проводов обмоток; плотности тока  $J_1$  и  $J_2$  в обмотках НН и ВН в А/мм<sup>2</sup>; масса отводов  $G_{\text{отв1}}$  и  $G_{\text{отв2}}$ , кг, определяемая для каждой обмотки по формуле (4.15).

Потери в стенках бака и других стальных деталях трансформатора, Вт,

$$P_{\text{б}} = k S_{\text{н}}, \quad (4.18)$$

где  $k$  – коэффициент, выбираемый по табл. 4.1;  $S_{\text{н}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Таблица 4.1

Значение коэффициента  $k$  в формуле (4.18)

Коэффициент	Номинальная мощность, кВ·А		
	до 1 000	1 000–4 000	6 300–10 000
$k$	0,15–0,2	0,25–0,4	0,4–0,45

Полные потери короткого замыкания, Вт,

$$P_{\text{к}} = P_{\text{очн1}} k_{\text{д1}} + P_{\text{очн2}} k_{\text{д2}} + P_{\text{отв1}} + P_{\text{отв2}} + P_{\text{б}}. \quad (4.19)$$

Потери короткого замыкания, полученные по формуле (4.19), не должны отличаться более чем на 5 % от значения  $P_{\text{к}}$  в задании на проектирование трансформатора.

## 4.2. Расчёт напряжения короткого замыкания

Напряжением короткого замыкания  $u_{\text{к}}$  двухобмоточного трансформатора называют напряжение, которое следует подвести к одной из обмоток при замкнутой накоротко другой обмотке, чтобы в обеих обмотках установились номинальные токи. При этом переключатель ответвлений об-

мотки ВН для регулирования напряжения должен находиться в положении, соответствующем номинальному напряжению.

Напряжение короткого замыкания определяет падение напряжения в трансформаторе при нагрузке, его внешнюю характеристику и ток короткого замыкания. Его рассчитывают в процентах от номинального напряжения первичной обмотки и учитывают при подборе трансформатора для параллельной работы.

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, %,

$$u_a = \frac{P_K}{10 S_H}, \quad (4.20)$$

где  $P_K$  – потери короткого замыкания по формуле (4.19), Вт;  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Для определения реактивной составляющей напряжения короткого замыкания необходимо рассчитать ряд коэффициентов.

Числовой коэффициент

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l}, \quad (4.21)$$

где  $l$  – наибольшая высота обмотки НН или ВН, полученная по расчету в главе 3, м;  $d_{12}$  – средний диаметр канала между обмотками, м,

$$d_{12} = \frac{D_1'' + D_2'}{2}. \quad (4.22)$$

Здесь  $D_1''$ ,  $D_2'$  – соответственно наружный диаметр обмотки НН и внутренний диаметр обмотки ВН в м.

Ширина приведенного канала рассеяния, мм, по рис. 4.2,

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (4.23)$$

где  $a_{12}$  – ширина канала между обмотками, мм, по табл. 2.7;  $a_1, a_2$  – радиальные размеры обмоток НН и ВН, мм.

Коэффициент, учитывающий отклонение реального поля рассеяния от идеального вследствие конечной высоты обмоток,

$$k_p = 1 - \sigma \left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}}\right), \quad (4.24)$$

где коэффициент

$$\sigma = \frac{a_1 + a_2 + a_{12}}{\pi l} \times 10^{-3}, \quad (4.25)$$

где размеры по рис. 4.2  $a_1, a_2, a_{12}$  в мм, длина обмоток  $l = l_1 \approx l_2$  в м.

Расчетный размер  $l_x$ , мм, определяющий различие по высоте обмоток НН и ВН (рис. 4.3), зависит от типа обмотки ВН и схемы регулирования напряжения. При вычислении  $l_x$  следует считать, что трансформатор работает на средней ступени регулирования напряжения ВН, когда через  $2w_p$  витков обмотки не проходит ток нагрузки. В непрерывной катушечной обмотке регулировочные витки расположены в середине высоты обмотки ВН (рис. 4.3, а) и в этом случае

$$l_x = n(b' + n'h_K) + h_{KP}, \quad (4.26)$$

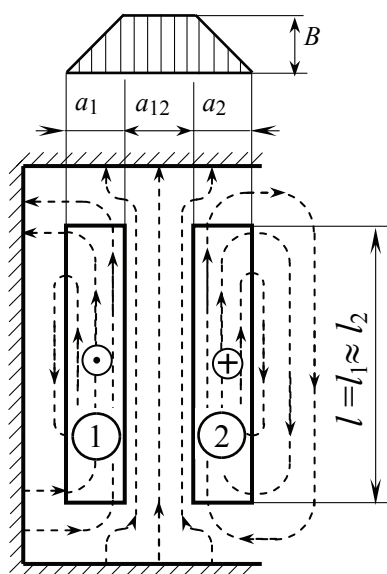


Рис. 4.2. Поле рассеяния двух обмоток

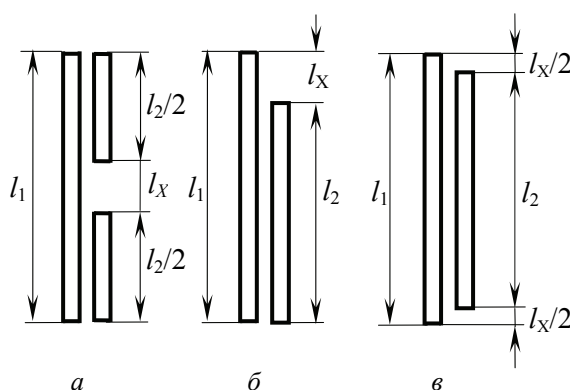


Рис. 4.3. К расчету  $l_x$

Здесь  $n = 2$ , если в обмотке четыре регулировочных катушки (Г) и  $n = 4$ , если регулировочных катушек восемь;  $b'$  – размер провода в изоляции обмотки ВН, мм; размеры радиальных каналов  $h_K$  и  $h_{KP}$ , мм, определены в пункте 3.2.3; в обмотках с каналами между всеми катушками  $n' = 1$ , при сдвоенных катушках  $n' = 0,5$ .

В многослойной цилиндрической обмотке  $l_x = 0$ , так как регулировочные витки обычно размещены в наружном слое обмотки, по всей ее высоте (рис. 3.7, а, б). Чрезвычайно редко в трансформаторах мощностью до 160 кВ·А допускается неравенство высот обмоток НН и ВН по рис. 4.3, б, в, тогда

$$l_x = |l_1 - l_2|. \quad (4.27)$$

Коэффициент, учитывающий взаимное расположение обмоток НН и ВН (рис. 4.3):

$$k_q = 1 + \frac{l_x^2}{m l_1 a_p k_p} \cdot 10^{-3}. \quad (4.28)$$

Здесь размеры  $l_x$  и  $a_p$  в мм;  $m = 3$  при расположении обмоток по рис. 4.3, а, в и  $m = 0,75$  – по рис. 4.3, б;  $l_1$  – высота обмотки НН, м.

Обычно  $k_q$  находится в пределах от 1,01 до 1,06.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %,

$$u_p = \frac{7,9 f S' \beta a_p k_p k_q}{u_B^2} \cdot 10^{-4}. \quad (4.29)$$

Здесь  $f$  – частота сети, равная 50 Гц;  $S'$  – мощность одной фазы трансформатора, определяемая по формуле (2.1), кВ·А; ширина канала рассеяния  $a_p$  – по формуле (4.23), мм;  $\beta$ ,  $k_p$ ,  $k_q$  – коэффициенты по формулам, соответственно, (4,21), (4,24) и (4.28);  $u_B$  – напряжение одного витка, В, по формуле (3.1).

Напряжение короткого замыкания, %,

$$u_K = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}. \quad (4.30)$$

Значение  $u_K$ , полученное по формуле (4.30), не должно отличаться от  $u_K$  в задании на проектирование трансформатора более чем на  $\pm 5$  %.

В тех случаях, когда полученное значение  $u_K$  не входит в указанные пределы, изменяют индукцию  $B_C$  или диаметр стержня  $d_H$ . Небольших отклонений  $u_K$  в нужном направлении можно достичь, изменив длину обмоток  $l_1$  и  $l_2$ . Если  $u_K$  меньше заданного, следует увеличить  $a_p$  в формуле (4.23) за счет  $a_{12}$ .

### 4.3. Определение механических сил в обмотках и нагрева обмоток при коротком замыкании

Внезапное короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора – это аварийный режим, который сопровождается многократным увеличением токов в обмотках по сравнению с номинальными токами, повышенным нагревом обмоток и ударными механическими силами, действующими на обмотки. Проверка обмоток на механическую прочность при коротком замыкании включает:

- расчет максимального тока короткого замыкания трансформатора;
- определение механических сил между обмотками и их частями;
- определение механических напряжений в изоляционных опорных и межкатушечных конструкциях и в проводах обмоток.

Действующее значение установившегося тока короткого замыкания в обмотке НН или ВН, А,

$$I_{\text{КУ}} = I_{\Phi} \frac{100}{u_{\text{К}}}, \quad (4.31)$$

где  $I_{\Phi}$  – номинальный ток соответствующей обмотки, А;  $u_{\text{К}}$  – напряжение короткого замыкания, %.

В результате взаимодействия тока в обмотках с магнитным полем обмоток (полем рассеяния) возникают электромагнитные силы, оказывающие механическое действие на обмотки.

В начальный момент короткого замыкания токи значительно превышают установившиеся значения за счет апериодической составляющей. Поэтому механические силы в обмотках в несколько раз превышают силы при установившемся токе короткого замыкания.

Наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания, А,

$$i_{\text{КМ}} = 1,41 k_{\text{М}} I_{\text{КУ}}, \quad (4.32)$$

где  $k_{\text{М}}$  – коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока короткого замыкания,

$$k_{\text{М}} = 1 + e^{-\frac{\pi u_{\text{а}}}{u_{\text{Р}}}}. \quad (4.33)$$

Механические силы, возникающие при коротком замыкании между обмотками и их частями, могут привести к разрушению обмотки, к деформации или разрыву витков или разрушению опорных конструкций. Поэтому обмотка должна быть механически прочной, что достигается ее максимальной монолитизацией: поджимом витков и опрессовкой всей обмотки, пропиткой обмотки лаками. Кроме этого, необходимо по возможности уменьшать механические силы, для чего обмотки ВН и НН выполняют одинаковой высоты с симметричным по отношению к середине высоты обмотки ВН расположением отключаемых регулировочных витков.

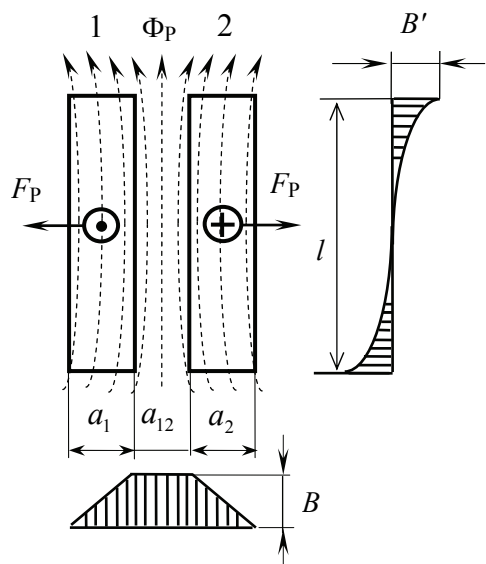
При рассмотрении механического действия электромагнитных сил отдельно оценивают осевые силы, сжимающие обмотку в осевом направлении, и радиальные силы, растягивающие внешнюю обмотку, изгибающие и сжимающие провода внутренней обмотки.

Магнитное поле рассеяния обмоток условно представляют в виде суммы продольного и поперечного магнитных полей. Индукционные линии продольного поля  $B$  направлены параллельно оси обмотки, поперечного  $B'$  – радиально. Наличие поперечного поля зависит от соотношения высоты и суммарной ширины  $(a_1 + a_{12} + a_2)$  обмоток. Чем выше и уже обмотка, тем меньше поперечное магнитное поле.



Согласно направлению токов на рис. 4.4 и правилу левой руки механические силы  $F_p$ , обусловленные продольным полем рассеяния, будут действовать на обмотки в радиально противоположных направлениях, сжимая обмотку НН и растягивая обмотку ВН.

Радиальная сила, действующая на обмотку ВН, Н,



$$F_p = 0,628 k_p \frac{\pi D_{CP2}}{l_2} (i_{KM} w_{2H})^2 \cdot 10^{-6} \quad (4.34)$$

Здесь  $k_p$  – коэффициент, вычисленный по формуле (4.24);  $D_{CP2}$  – средний диаметр обмотки ВН в м;  $l_2$  – осевой размер (высота) обмотки ВН, м;  $i_{KM}$  – наибольший мгновенный (ударный) ток по формуле (4.32), А;  $w_{2H}$  – число витков обмотки ВН.

На обмотку НН действует радиальная сила, равная приложенной к обмотке ВН силе  $F_p$ , но противоположного направления.

Поперечное поле рассеяния, направление которого в верхних и нижних половинах обмоток прямо противоположно, образует механические силы  $F'_{OC}$  (рис. 4.5), сжимающие обмотки в осевом направлении. Осевую силу  $F'_{OC}$ , Н, определяют по формуле

$$F'_{OC} = F_p \frac{a_p}{2l} \cdot 10^{-3}. \quad (4.35)$$

Здесь  $F_p$  – радиальная сила, Н;  $a_p$  – ширина приведенного канала рассеяния, определяемая по формуле (4.23), мм;  $l$  – реальная средняя длина обмоток, м.

Равномерное распределение витков по высоте обеих обмоток встречается только в многослойных цилиндрических обмотках на стороне ВН, когда отключаемые регулировочные витки располагаются по высоте всего наружного слоя обмотки так, как показано на рис. 3.7, б. Во всех других случаях возможно взаимное расположение обтекаемых током частей обмоток, при котором  $l_x \neq 0$  (рис. 4.3) и возникает второе поперечное поле, вызывающее дополнительную осевую силу  $F_{OC}$ , Н,

$$F''_{OC} = F_p \frac{l_x F_p}{l'' k_p m} \cdot 10^{-3}. \quad (4.36)$$

Здесь расстояние от стержня магнитопровода до стенки бака трансформатора, м,

$$l'' = \frac{D_2'' - d_H}{2} + S_5, \quad (4.37)$$

где  $D_2''$ , – наружный диаметр обмотки ВН, м;  $d_H$  – нормализованный диаметр стержня трансформатора, м;  $S_5$  – расстояние, м, от обмотки ВН до стенки бака, по табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Расстояние от обмотки ВН до стенки бака**

Расстояние от обмотки ВН до стенки бака, м	Испытательное напряжение обмотки ВН, кВ			
	до 25	35	55	85
$S_5$	0,06	0,06	0,084	0,12

Расчет  $F''_{OC}$  ведут при наиболее неблагоприятных условиях, когда трансформатор работает на низшей ступени регулирования напряжения и обесточено  $4w_p$  витков. Расстояние  $l_x$ , мм, для непрерывной катушечной обмотки с размещением регулировочных катушек в середине ее высоты определяют по формуле (4.26), принимая  $n = 4$  при четырех регулировочных катушках (Г) и  $n = 8$  при восьми таких катушках. В других случаях принимают  $l_x = |l_1 - l_2|$ . Коэффициент  $k_p$  определяют по формуле (4.24). Коэффициент  $m$  из рис. 4.5.

После определения  $F_p$ ,  $F'_{OC}$  и  $F''_{OC}$  следует найти максимальное значение сжимающей силы в обмотке  $F_{CЖ}$  и действующей на ярмо силы  $F_{Я}$ . Эти силы находят для каждой из обмоток в зависимости от соотношения сил  $F'_{OC}$  и  $F''_{OC}$  и взаимного расположения обмоток, воспользовавшись рис. 4.5, где цифрой 1 обозначена обмотка НН, а цифрой 2 обмотка ВН.

Осевые сжимающие силы воспринимаются обычно межкатушечными и опорными прокладками из электроизоляционного картона (рис. 3.11). На рис. 4.6, б показаны опорные поверхности, воспринимающие осевые силы, для числа прокладок  $n = 8$ .

Для оценки механической прочности обмотки вычисляют напряжение сжатия в прокладках межкатушечной (межвитковой) и опорной изоляции и напряжение на разрыв обмотки.

Напряжение сжатия на опорных поверхностях, МПа,

$$\sigma_{CЖ} = \frac{F_{CЖ}}{n a b}, \quad (4.38)$$

где  $F_{CЖ}$  – сжимающая сила, Н;  $n$  – число прокладок по окружности обмотки, равное числу реек (табл. 3.7);  $a$  – радиальный размер обмотки, мм;  $b$  – ширина опорной прокладки, равная (40–60) мм.

Взаимное положение обтекаемых током частей обмоток	Случай $F''_{OC} > F'_{OC}$		Другие случаи
	Обмотка 1	Обмотка 2	
<p><i>a</i></p>			—
<p><i>б</i> <math>m=1</math></p>			—
<p><i>в</i> <math>m=4</math></p>			Обмотка 2 
<p><i>г</i> <math>m=4</math></p>			Обмотка 1 

Рис. 4.5. Схемы сжимающих осевых сил для различных случаев взаимного положения обтекаемых током частей обмоток

В формулу (4.38) подставляют максимальное значение сжимающей осевой силы  $F_{СЖ}$ , вычисленное по формулам рис. 4.5. В случаях, когда  $F_{я} > F_{СЖ}$ , следует подставлять в формулу (4.38) силу  $F_{я}$ , вычисленную по формулам рис. 4.5.

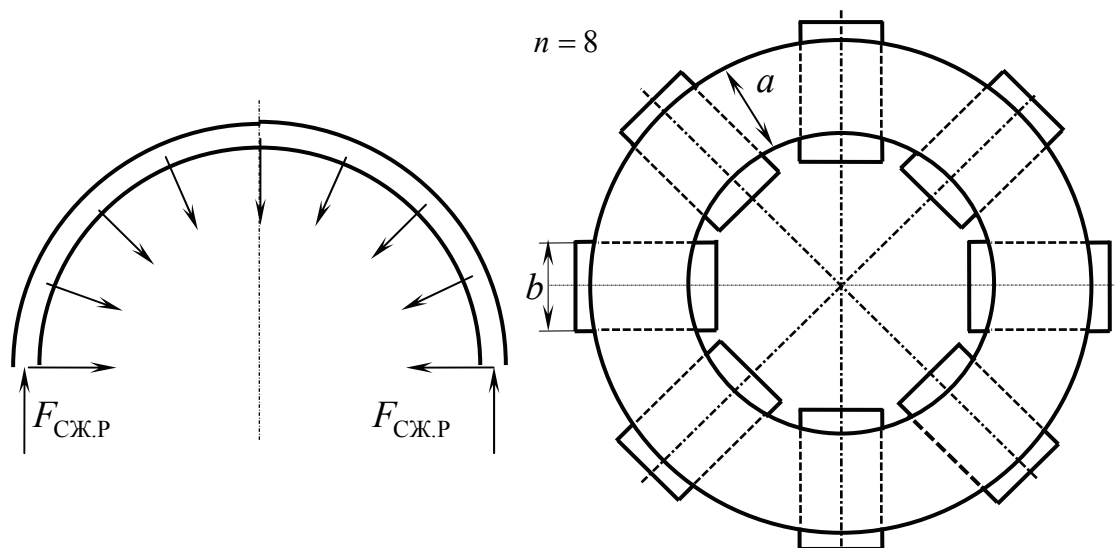


Рис. 4.6. К определению механических напряжений в обмотках:  
 $a$  – силы, сжимающие обмотку;  $b$  – опорные поверхности обмотки

В трансформаторах мощностью до 6 300 кВ·А включительно напряжение сжатия  $\sigma_{СЖ}$  не должно превышать (18 – 20) МПа.

Для оценки механической прочности обмотки определяют напряжение сжатия во внутренней обмотке (НН), возникающее под воздействием радиальной силы  $F_{СЖ.Р}$ .

Сила, сжимающая внутреннюю обмотку (рис. 4.6,  $a$ ), Н,

$$F_{СЖ.Р} = F_{р} / 2\pi . \quad (4.39)$$

Напряжение сжатия в проводе внутренней обмотки, МПа,

$$\sigma_{СЖ.Р} = \frac{F_{СЖ.Р}}{w \Pi} , \quad (4.40)$$

где  $w$  – число витков обмотки, для которой определена сила;  $\Pi$  – площадь поперечного сечения одного витка, мм<sup>2</sup>.

Для обеспечения стойкости этой обмотки при воздействии радиальных сил рекомендуется не допускать  $\sigma_{СЖ.Р}$  в медных проводах более 30 МПа и в алюминиевых более 15 МПа.

Температура обмотки через  $t_k$  секунд после возникновения короткого замыкания, °С,

$$\vartheta_K = \frac{670 t_K}{k \left(\frac{u_K}{J}\right)^2 - t_K} + \vartheta_H, \quad (4.41)$$

где  $t_K$  – наибольшая продолжительность короткого замыкания на выводах масляного трансформатора, принимаемая при напряжении не более 35 кВ примерно равной 4 секундам;  $k$  – коэффициент, равный 12,5 для медных и 5,5 для алюминиевых проводов обмоток;  $u_K$  – напряжение короткого замыкания, % по формуле (4.30);  $J$  – плотность тока в рассматриваемой обмотке, А/мм<sup>2</sup>;  $\vartheta_H$  – начальная температура обмотки, принимаемая равной 90°C.

Вычисленное значение температуры  $\vartheta_K$  должно удовлетворять условию  $\vartheta_K \leq 250^\circ\text{C}$  для медного и  $\vartheta_K \leq 200^\circ\text{C}$  для алюминиевого провода обмоток.

## 5. РАСЧЁТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРА

### 5.1. Определение размеров и массы магнитной системы

При расчёте магнитной системы определяют размеры пакетов стали и активные сечения стержня и ярма, высоту стержня, расстояние между осями стержней, массу стержней, ярм и всего магнитопровода. По результатам расчётов магнитной системы определяют потери в стали и ток холостого тока трансформатора.

Поперечное сечение стержней и ярм представляет собой ступенчатую фигуру, состоящую из пакетов пластин электротехнической стали (рис. 2.1, 5.1). Число ступеней  $n$  в сечении стержня принимают равным числу вершин углов пакетов в одной четверти сечения (рис. 5.1) или числу пакетов стали в половине круга диаметром  $d$ , описанного вокруг фигуры сечения стержня (рис. 2.1).

Число и размеры пакетов стали стержня выбирают из ряда противоречивых условий. Для уменьшения диаметра стержня, размеров обмоток и стоимости активных материалов желательно увеличивать число ступеней  $n$ , чтобы приблизить форму сечения к кругу и получить наибольшую площадь сечения стержня. Но с увеличением числа ступеней увеличиваются число пластин стали разной ширины, отходы при раскрое электротехнической стали и трудоемкость сборки магнитопровода. Кроме того, приходится отступать от оптимальных размеров пакетов стали вследствие необходимости образования вертикальных каналов, служащих для охлаждения и установки деталей поперечной прессовки стержня.

В табл. 5.1 – 5.3 приведены размеры поперечного сечения стержней, соответствующие указанным требованиям. Число ступеней  $n$  в сечении стержня, ширину пластин  $a$  и толщину пакетов  $b$  следует выбрать по табл. 5.1 – 5.3 для определенного в главе 2 нормализованного диаметра стержня  $d_n$ .

Стержни диаметром до 0,22 м включительно прессуют расклиниванием с внутренней обмоткой, забивая деревянные планки между ступенчатым стержнем и обмоткой. Стержни диаметром более 0,22 м обычно прессуют бандажами из стеклоленты [1, 3–6].

Число и размеры пакетов стали в табл. 5.1 – 5.3 даны для двух вариантов осевой прессовки магнитопровода [1, 3–6].

1. Верхние и нижние ярмовые балки стягивают вертикальными шпильками, расположенными снаружи обмоток (без прессующей пластины).

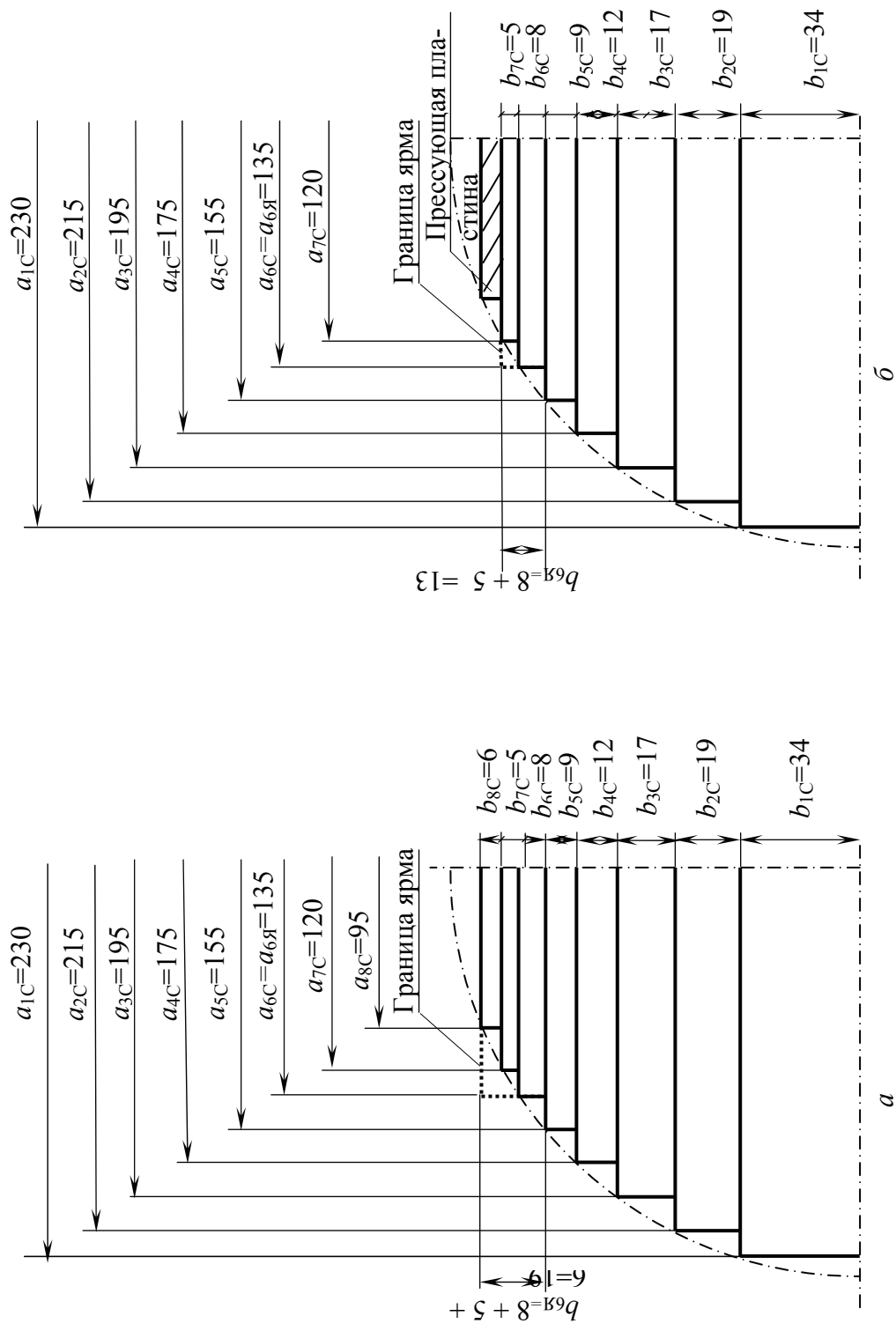


Рис. 5.1. Сечение стержня и ярма по табл. 5.2 для стержня диаметром 0,24 м:  
 а – стержень без прессующей пластины; б – стержень с прессующей пластиной

Таблица 5.1

**Ширина пластин  $a$  и толщина пакетов  $b$ , мм, стали магнитопроводов с прессовкой стержней расклиниванием с внутренней обмоткой (без прессующей пластины)**

$d$ , м	$n_c$	$k_{кр}$	$n_y$	$a_y$ , мм	Размеры пакетов стали в стержне $a \times b$ , мм,				
					75×14	65×9	55×6	40×5	–
0,080	4	0,863	3	55					–
0,085	5	0,895	4	50	80×14	70×10	60×6	50×4	40×4
0,090	5	0,891	4	55	85×15	75×10	65×6	55×4	40×5
0,095	5	0,887	4	50	90×15	80×10	65×9	50×5	40×4
0,100	6	0,917	5	55	95×16	85×10	75×7	65×5	55×4
0,105	6	0,912	5	50	100×16	90×11	80×7	65×7	50×4
0,110	6	0,905	5	65	105×16	95×11	85×7	75×6	65×4
0,115	5	0,903	4	65	105×25	95×9	85×6	65×9	40×3
0,120	6	0,928	5	60	115×18	105×11	90×10	75×8	60×6
0,125	6	0,915	5	65	120×18	105×16	95×6	85×6	65×7
0,130	6	0,918	5	65	125×18	110×16	100×8	80×9	65×5
0,140	6	0,919	5	65	135×19	120×17	105×10	85×9	65×7
0,150	6	0,915	5	85	145×19	135×13	120×13	105×9	85×8
0,160	6	0,913	5	85	155×20	135×23	120×10	105×7	85×7
0,170	6	0,927	5	85	160×28	145×17	130×10	110×10	85×8
0,180	6	0,915	5	95	175×21	155×25	135×13	120×8	95×9
									65×8

*Примечание.*  $d$  – диаметр стержня,  $a_y$  – ширина крайнего пакета наружного пакета ярма;  $n_c$  и  $n_y$  – число ступеней в сечениях стержня и ярма;  $k_{кр}$  – коэффициент заполнения круга для стержней.



Таблица 5.2

**Ширина пластин  $a$  и толщина пакетов  $b$ , мм, стали магнитопроводов с прессовкой стержней расклиниванием с внутренней обмоткой (при  $d \leq 0,22$  м) или бандажами из стеклоленты**

Диаметр стержня	Стержень				Ярмо		Размеры пакетов $a \times b$ , мм, в стержне									
	без прессующей пластины		с прессующей пластиной		$n_я$	$a_я$ , мм										
$d$ , м	$n_c$	$k_{кр}$	$n_c$	$k_{кр}$			1	2	3	4	5	6	7	8		
0,19	7	0,927	6	0,890	5	100	180×30	165×17	145×14	130×8	115×7	100×5	75×7	—		
0,20	7	0,918	6	0,885	5	120	195×22	175×26	155×15	135×11	120×6	105×5	75×7	—		
0,21	7	0,922	6	0,890	5	130	200×32	180×22	160×14	145×8	130×6	110×8	90×6	—		
0,22	8	0,929	7	0,901	6	120	215×23	195×28	175×15	155×12	135×9	120×5	105×4	75×7		
0,23	8	0,933	7	0,907	6	130	220×34	205×19	185×16	165×12	145×9	130×5	115×5	90×6		
0,24	8	0,927	7	0,902	6	135	230×34	215×19	195×17	175×12	155×9	135×8	120×5	95×6		
0,25	8	0,929	7	0,909	6	140	240×35	220×24	200×16	180×12	155×11	140×6	120×6	100×5		
0,26	8	0,924	7	0,900	6	155	250×35	230×25	215×13	195×13	175×10	155×8	120×9	105×6		
0,27	8	0,930	7	0,901	6	155	260×36	240×25	215×20	195×13	170×11	155×5	135×7	105×8		
0,28	8	0,927	7	0,903	6	175	270×37	250×26	230×17	215×9	195×11	175×9	135×13	105×7		
0,29	8	0,927	7	0,899	6	165	280×37	260×27	235×21	210×15	180×13	165×6	145×6	115×8		
0,30	8	0,930	7	0,912	6	175	295×28	270×37	250×18	230×13	215×8	175×18	135×12	105×6		

*Примечание.* 1. В магнитопроводах с прессующей пластиной исключить последний (7-й или 8-й) пакет стержня.

2. Крайний наружный пакет ярма имеет ширину  $a_y$  и толщину, равную сумме толщин трех крайних (5–7-го или 6–8-го) пакетов при отсутствии прессующей пластины, или двух крайних (5–6-го или 6–7-го) при наличии прессующей пластины.

3.  $d$  – диаметр стержня;  $a_y$  – ширина крайнего наружного пакета ярма;  $n_c$  и  $n_y$  – число ступеней в сечениях стержня и ярма;  $k_{кр}$  – коэффициент заполнения круга для стержней.

Таблица 5.3

Ширина пластин  $a$  и толщина пакетов  $b$ , мм, стали магнитных систем с прессовкой стержней бандажами из стеклоленты

Диаметр стержня $d$ , мм	Стержень				Ярмо		Толщина пакетов стержня $b$ , мм, при ширине пластин $a$ , мм																			
	без прессующей пластины		с прессующей пластиной		$n_{\text{я}}$	$a_{\text{я}}$ , мм																				
		$n_{\text{с}}$	$k_{\text{кр}}$					310	300	295	280	270	260	250	245	230	215	210	195	190	160	155	135			
0,31	9	0,930	8	0,905	7	190	—	39	—	28	—	18	—	10	9	—	10	—	9	10	—	7				
0,32	9	0,928	8	0,911	7	195	40	—	22	—	24	—	14	—	11	7	—	8	—	—	12	5				
при ширине пластин $a$ , мм																										
0,33	9	0,932	8	0,900	7	205	325	320	310	295	275	270	265	250	245	230	225	205	195	165	155	135				
0,34	9	0,931	8	0,913	7	195	50	—	19	15	—	19	—	12	—	10	—	—	14	—	11	6				
при ширине пластин $a$ , мм																										
0,35	9	0,938	8	0,903	7	215	350	340	325	315	295	280	270	260	250	235	230	215	195	180	155	135				
0,36	9	0,913	8	0,894	7	195	42(3)	—	35	—	26	—	16	—	10	—	9	—	13	—	9	7				
при ширине пластин $a$ , мм																										
0,37	10	0,920	9	0,902	8	200	368	360	350	335	325	310	295	275	250	230	215	200	170	155	135	—				
0,38	10	0,913	9	0,899	8	215	47(3)	—	27	—	24	12	10	—	23	—	13	—	—	15	6	—				
при ширине пластин $a$ , мм																										
0,39	10	0,925	9	0,904	8	210	380	355	325	310	290	265	240	210	180	140	—	—	—	—	—	—				
при ширине пластин $a$ , мм																										
0,40	11	0,920	10	0,910	8	215	410	395	368	350	325	295	270	250	215	195	175	155	—	—	—	—				
0,42	11	0,926	10	0,906	8	250	—	54(3)	24	18	20	19	12	9	12	6	6	4	—	—	—	—				
при ширине пластин $a$ , мм																										
0,42	11	0,926	10	0,906	8	250	46(3)	38	17	15	17	16	12	7	12	6	—	9	—	—	—	—				

Примечание. 1. В магнитопроводах с прессующей пластиной исключить последний пакет стержня с наименьшей шириной  $a$ .

2. Крайний пакет ярма имеет ширину  $a_{\text{я}}$  и толщину, равную сумме толщин трех ( $d = 0,31–0,39$  м) или четырех ( $d = 0,4–0,42$  м) крайних пакетов стержня при отсутствии прессующей пластины. При ее наличии число объединенных пакетов ярма уменьшить на единицу.

3. В скобках указана ширина охлаждающего канала в мм.

4.  $d$  – диаметр стержня;  $a_{\text{я}}$  – ширина крайнего наружного пакета ярма;  $n_{\text{с}}$  и  $n_{\text{я}}$  – число ступеней в сечениях стержня и ярма;  $k_{\text{кр}}$  – коэффициент заполнения круга для стержней.

2. Верхние и нижние ярмовые балки соединяют стальными прессующими пластинами, установленными на стержне вместо крайних узких пакетов стали. Вследствие этого число пакетов  $n$  и сечение стали стержня уменьшается по сравнению с первым вариантом осевой прессовки стержня. Соединение ярмовых балок прессующими пластинами применяют для стержней с диаметром более 0,18 м.

Форма поперечного сечения ярма в средней части по размерам повторяет сечение стержня. Крайние пакеты стали ярма делают более широкими, объединяя два–три пакета в один. Это необходимо для улучшения прессовки ярем ярмовыми балками, более равномерного распределения давления по ширине пакетов и уменьшения веера пластин на углах пакетов. Для изображенных на рис. 5.1 двух вариантов сечения стержня диаметром 0,24 м крайний пакет ярма в первом варианте (без прессующей пластины) имеет размеры: ширина пакета  $a_{6я} = 135$  мм, толщина пакета  $b_{6я} = 8 + 5 + 6 = 19$  мм, а во втором варианте (с прессующей пластиной): ширина  $a_{6я} = 135$  мм, толщина  $b_{6я} = 8 + 5 = 13$  мм. Площадь поперечного сечения стержня или ярма определяется суммированием площадей всех пакетов стали соответствующего сечения, определяемых произведением размеров пакета  $a \times b$ . При наличии продольных охлаждающих каналов (смотри примечания к табл. 5.3) из толщины  $b$  соответствующих пакетов стержня и ярма исключают ширину охлаждающих каналов. Полные площади поперечного сечения стержня  $P_{фс}$  и ярма  $P_{фя}$  приведены в табл. 5.4 (по размерам пакетов в табл. 5.1) и табл. 5.5 (по размерам пакетов в табл. 5.2, 5.3). В этих же таблицах указан объем угла  $V_y$  магнитопровода.

Активное сечение стержня  $P_c$  и ярма  $P_y$ , м<sup>2</sup>,

$$P_c = k_3 P_{фс} \cdot 10^{-4}; \quad (5.1)$$

$$P_y = k_3 P_{фя} \cdot 10^{-4}. \quad (5.2)$$

Здесь площади сечений  $P_{фс}$  и  $P_{фя}$ , см<sup>2</sup>, определяются по табл. 5.4, 5.5;  $k_3$  – коэффициент заполнения сталью. Для сталей с термостойким покрытием при толщине листов 0,35; 0,3; 0,27 коэффициент  $k_3$  соответственно равен 0,97; 0,96; 0,95. При прессовке стержней расклиниванием с внутренней обмоткой ( $d \leq 0,22$  м) указанные значения  $k_3$  следует уменьшить на 0,01. Если для усиления изоляции листов стали поверх термостойкого покрытия нанесен один слой лака,  $k_3$  уменьшают дополнительно на 0,005.

Длина стержня трансформатора, м,

$$l_c = l_2 + (l'_0 + l''_0) \cdot 10^{-3}, \quad (5.3)$$

Здесь  $l_2$  – высота обмотки ВН, м, рассчитанная в главе 3;  $l'_0$  и  $l''_0$  – расстояния от обмотки ВН соответственно до верхнего и нижнего ярма, мм, выбирают в зависимости от класса напряжения и способа осевой прессовки обмоток [1, 3–6].

Таблица 5.4

**Площади сечения стержня  $P_{\text{ФС}}$ , ярма  $P_{\text{ФЯ}}$  и объем угла  $V_{\text{У}}$  плоской шихтованной магнитной системы без прессующей пластины при размерах пакетов по табл. 5.1**

$d, \text{ м}$	$P_{\text{ФС}}, \text{ см}^2$	$P_{\text{ФЯ}}, \text{ см}^2$	$V_{\text{У}}, \text{ см}^3$	$d, \text{ м}$	$P_{\text{ФС}}, \text{ см}^2$	$P_{\text{ФЯ}}, \text{ см}^2$	$V_{\text{У}}, \text{ см}^3$
0,080	43,3	44,8	280,8	0,120	104,9	106,5	1050
0,085	50,8	51,6	356,4	0,125	112,3	115,3	1194
0,095	56,7	58,2	426,4	0,13	121,9	124,9	1299
0,090	62,9	63,7	488,0	0,14	141,5	144,0	1620
0,100	72,0	73,2	596,8	0,15	161,7	165,9	2040
0,105	79,3	80,1	683,0	0,16	183,5	188,3	2470
0,110	86,2	89,7	790,2	0,17	208,5	214,1	2908
0,115	93,9	95,4	812,8	0,18	232,8	237,6	3452

Таблица 5.5

**Площади сечения стержня  $P_{\text{ФС}}$ , ярма  $P_{\text{ФЯ}}$  и объем угла  $V_{\text{У}}$  шихтованной магнитной системы без прессующей пластины и с прессующей пластиной с размерами пакетов по табл. 5.2, 5.3**

$d, \text{ м}$	Без прессующей пластины			С прессующей пластиной		
	$P_{\text{ФС}}, \text{ см}^2$	$P_{\text{ФЯ}}, \text{ см}^2$	$V_{\text{У}}, \text{ см}^3$	$P_{\text{ФС}}, \text{ см}^2$	$P_{\text{ФЯ}}, \text{ см}^2$	$V_{\text{У}}, \text{ см}^3$
0,19	262,8	267,3	4118	252,3	253,3	4012
0,20	288,4	296,2	4811	277,9	273,4	4685
0,21	319,2	327,2	5680	308,4	311,6	5522
0,22	353,0	360,5	6460	342,5	343,7	6334
0,23	387,7	394,0	7482	376,9	378,4	7342
0,24	419,3	425,6	8428	407,9	409,4	8274
0,25	456,2	462,6	9532	446,2	448,6	9392
0,26	490,6	507,1	10746	478,0	488,5	10550
0,27	532,6	543,4	12018	515,8	518,6	11758
0,28	570,9	591,1	13738	556,2	566,6	13480
0,29	612,4	622,8	14858	594,0	596,4	14554
0,30	657,2	675,2	16556	644,6	654,2	16336
0,31	702,0	715,8	18672	683,0	689,4	18312
0,32	746,2	762,4	20144	732,7	743,9	19880
0,33	797,1	820,8	22382	770,1	779,2	21828
0,34	844,8	860,8	23732	828,6	837,4	23416
0,35	903,6	927,6	26814	868,6	876,0	26118
0,36	929,2	948,8	27944	910,3	917,5	27574
0,37	988,8	1003,8	30606	969,8	975,8	30228
0,38	1035,8	1063,4	33074	1019,6	1037,6	32716
0,39	1105,2	1123,6	35966	1080,0	1085,8	35438
0,40	1155,6	1167,6	39550	1143,2	1150,4	39284
0,42	1282,9	1315,0	46220	1255,0	1270,0	45528

В трансформаторах мощностью менее 1000 кВ·А для осевой стяжки обмоток используют вертикальные шпильки, соединяющие верхние и нижние ярмовые балки. В этом случае  $l'_0$  и  $l''_0$  определяют из условия изо-

ляции обмотки ВН от ярма и принимают равными размеру  $l_{02}$  по табл. 2.8 (рис. 2.19).

В трансформаторах мощностью свыше 1000 кВ·А обмотки в осевом направлении стягивают прессующими кольцами и нажимными винтами. При вертикальной стяжке магнитопровода прессующими пластинами осевую стяжку обмоток также выполняют прессующими кольцами для трансформаторов всех мощностей. При наличии прессующих колец  $l''_0 = l_{02}$  по табл. 2.8 расстояние до верхнего ярма следует выбрать согласно прим. 2 к табл. 2.8.

Расстояние между осями соседних стержней, м,

$$C = D_2'' + a_{22} \cdot 10^{-3}, \quad (5.4)$$

где  $D_2''$  – внешний диаметр обмотки ВН, м;  $a_{22}$  – расстояние между обмотками ВН соседних стержней по табл. 2.8, мм.

Значение  $C$  округляют до величины кратной 0,005 м.

Масса стали в стержнях и ярмах плоской шихтованной системы определяется суммированием масс прямых участков и углов. Углом называется часть магнитной системы, заключенная в объеме, образованном пересечением боковых призматических поверхностей одного ярма и одного стержня.

Масса стали угла при многоступенчатой форме сечения, кг,

$$G_y = k_3 V_y \gamma_{CT} \cdot 10^{-6}, \quad (5.5)$$

где  $V_y$  – объем угла магнитной системы по табл. 5.4, 5.5, см<sup>3</sup>;  $\gamma_{CT} = 7650$  кг/м<sup>3</sup> – плотность трансформаторной стали.

Масса стали двух ярм трехфазного трансформатора, кг,

$$G_{я} = 4 C \Pi_{я} \gamma_{CT} + 2 G_y, \quad (5.6)$$

где  $C$  – расстояние между осями стержней, м; сечение  $\Pi_{я}$ , м<sup>2</sup>.

Масса стали стержней, кг,

$$G_C = 3 [\Pi_C \gamma_{CT} (l_C + a_{1я} \cdot 10^{-3}) - G_y]. \quad (5.7)$$

Здесь  $\Pi_C$  – активное сечение стержня, м<sup>2</sup>; плотность трансформаторной стали  $\gamma_{CT} = 7650$  кг/м<sup>3</sup>; длина стержня  $l_C$ , м;  $a_{1я}$  – ширина среднего пакета стали ярма, мм, равная  $a_{1C}$ , по табл. 5.1–5.3 и рис. 5.1.

Полная масса магнитной системы трансформатора, кг,

$$G_{СП} = G_{я} + G_C. \quad (5.8)$$

После определения массы магнитопровода и его частей рассчитывают потери и ток холостого хода.

## 5.2. Определение потерь холостого хода трансформатора

Режим работы трансформатора при питании от сети одной обмотки и разомкнутой другой обмотке называется режимом холостого хода. Потери мощности в режиме холостого хода трансформатора при номинальном синусоидальном напряжении и номинальной частоте называют потерями холостого хода.

Потери холостого хода трансформатора  $P_X$  состоят из магнитных потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе, потерь в стальных элементах конструкции трансформатора от потоков рассеяния, электрических потерь в первичной обмотке от тока холостого хода и диэлектрических потерь в изоляции.

Диэлектрические потери в изоляции достаточно велики только при высоких частотах ( $10^3$ – $10^6$  Гц) и высоких напряжениях. В силовых трансформаторах промышленной частоты 50 Гц их можно не учитывать.

Электрические потери при холостом ходе не превышают 1 % от  $P_X$ , и ими обычно пренебрегают. Потери в стальных элементах конструкции при холостом ходе относительно невелики и учитываются вместе с другими добавочными потерями.

*Магнитные потери в активной стали магнитопровода составляют основную часть потерь холостого хода. Поэтому с достаточной степенью точности можно считать, что потери холостого хода – это магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе.*

При определении магнитных потерь пользуются зависимостью удельных потерь в электротехнической стали  $p$  от амплитуды магнитной индукции  $B$  (табл. 5.6).

Магнитную индукцию в стержне  $B_C$  и ярме  $B_Я$ , определяют по напряжению витка  $u_B$ , В, и окончательно рассчитанным в разделе 5.1 активным сечениям стержня  $\Pi_C$  и ярма  $\Pi_Я$ , м<sup>2</sup>,

$$B_C = \frac{u_B}{4,44 f_1 \Pi_C}, \quad (5.9)$$

$$B_Я = \frac{u_B}{4,44 f_1 \Pi_Я}. \quad (5.10)$$

Удельные потери в табл. 5.6 даны для случая, когда вектор магнитной индукции  $B$  или направление магнитного потока  $\Phi$  совпадает с направлением прокатки стали. При отклонении магнитного потока от направления прокатки возникают добавочные потери в стали и увеличиваются магнитные потери.

Пластины стержней и ярм из холоднокатаной стали вырезают так, чтобы направление потока  $\Phi$  в магнитопроводе совпадало с направлением прокатки стали.

Таблица 5.6

**Удельные потери в стали  $p$  для холоднокатаных сталей 3404 и 3405  
при различных индукциях и частоте  $f = 50$  Гц**

$B$ , Тл	$p$ , Вт/кг			$B$ , Тл	$p$ , Вт/кг		
	3404, 0,35 мм	3404, 0,3 мм	3405, 0,3 мм		3404, 0,35 мм	3404, 0,3 мм	3405, 0,3 мм
1,28	0,763	0,731	0,694	1,62	1,353	1,278	1,194
1,30	0,785	0,755	0,715	1,64	1,411	1,326	1,238
1,32	0,814	0,779	0,739	1,66	1,472	1,380	1,288
1,34	0,843	0,803	0,763	1,68	1,536	1,440	1,344
1,36	0,872	0,827	0,787	1,70	1,600	1,500	1,400
1,38	0,901	0,851	0,811	1,72	1,672	1,560	1,460
1,40	0,930	0,875	0,835	1,74	1,744	1,620	1,520
1,42	0,964	0,906	0,860	1,76	1,824	1,692	1,588
1,44	0,998	0,937	0,869	1,78	1,912	1,776	1,664
1,46	1,032	0,968	0,916	1,80	2,00	1,86	1,740
1,48	1,066	0,999	0,943	1,82	2,09	1,95	1,815
1,50	1,100	1,030	0,970	1,84	2,18	2,04	1,89
1,52	1,134	1,070	1,004	1,86	2,27	2,13	1,97
1,54	1,168	1,110	1,038	1,88	2,36	2,22	2,06
1,56	1,207	1,150	1,074	1,90	2,45	2,30	2,15
1,58	1,251	1,190	1,112	1,95	2,70	2,53	2,39
1,60	1,295	1,230	1,150	2,00	3,00	2,82	2,63

*Примечание.* Удельные потери для стали марки 3405 толщиной 0,35 мм принимать по графе для стали 3404 толщиной 0,3 мм.

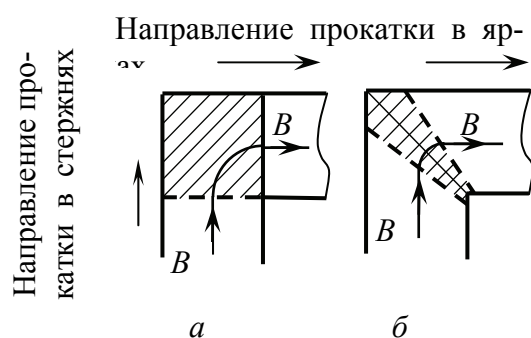


Рис. 5.2. Части магнитопровода с повышенными магнитными потерями при прямых и косых стыках пластин стали стержней и ярм

В углах магнитопровода с прямыми стыками пластин ярма и стержня по рис. 5.2, а угол между вектором индукции  $B$  и направлением прокатки стали изменяется от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , что приводит к увеличению магнитных потерь в заштрихованной зоне.

При косых стыках по рис. 5.2, б заштрихованная зона несовпадения направлений магнитного потока и проката стали меньше, чем при прямых стыках. Следовательно, увеличение магнитных потерь зависит от числа косых и прямых стыков в магнитопроводе (рис. 2.3) и может быть учтено коэффициентом  $k_{\text{ПУ}}$ , характеризующим увеличение потерь в углах магнитопровода (табл. 5.7).

Таблица 5.7

**Коэффициент  $k_{пу}$  увеличения потерь в углах с косыми и прямыми стыками пластин стали по рис. 2.3 при  $B = 0,9 - 1,7$  Тл и  $f = 50$  Гц**

Число углов со стыками		Значение коэффициента $k_{пу}$ для марок стали с толщиной листов		
с косыми стыками	с прямыми стыками	3404; 0,35 мм	3404; 0,30 мм; 3405; 0,35 мм	3405; 0,3 мм
6	—	8,58	8,75	8,85
5*	1*	9,38	9,6	9,74
4	2	10,18	10,45	10,64

*Примечание.* \* Комбинированный стык по рис. 2.3, в, г.

Магнитные потери увеличиваются также из-за технологических операций резки пластин стали, закатки и срезания заусенцев, прессовки стержней и ярм магнитной системы, расшихтовки и зашихтовки верхнего ярма для насадки обмоток на стержни. Общее увеличение магнитных потерь из-за технологических операций учитывают коэффициентом добавочных потерь  $k_{пд}$  (табл. 5.8). В таблице приведены значения коэффициента  $k_{пд}$  для отожденных и неотожденных пластин. Отжиг пластин магнитопровода после резки и закатки заусенцев уменьшает добавочные потери.

Таблица 5.8

**Коэффициент добавочных потерь  $k_{пд}$  для стали марок 3404 и 3405**

$S_H$ , кВ·А	До 250	400 – 630	1000–6300	10000 и более
Пластины отождены	1,12	1,13	1,15	1,20
Пластины не отождены	1,22	1,23	1,26	1,31

Потери холостого хода в магнитопроводе стержневого типа, Вт,

$$P_X = k_{пд} p_C (G_C + 0,5 k_{пу} G_Y) + k_{пд} p_Y (G_Y - 6 G_Y + 0,5 k_{пу} G_Y). \quad (5.11)$$

Здесь коэффициенты  $k_{пу}$  и  $k_{пд}$  по табл. 5.7, 5.8; удельные потери в стержне  $p_C$  и ярме  $p_Y$ , Вт/кг, определяют по табл. 5.6 в зависимости от индукций  $B_C$  и  $B_Y$ ; массы стержней  $G_C$ , ярм  $G_Y$  и угла  $G_Y$  магнитопровода в кг.

*Полученное значение потерь холостого хода  $P_X$  не должно отличаться от заданного более чем на  $\pm 7,5$  %.*

### 5.3. Определение тока холостого хода трансформатора

Ток первичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода при номинальном напряжении и номинальной частоте называется током холостого хода.



Активная составляющая тока холостого хода зависит от потерь холостого хода  $P_X$ . Реактивная составляющая определяет реактивную намагничивающую мощность  $Q_X$ , потребляемую трансформатором из сети и расходуемую на создание магнитного потока в магнитопроводе трансформатора.

Ток холостого хода и его активную и реактивную составляющие определяют в % от номинального тока первичной обмотки.

Активная составляющая тока холостого хода, %,

$$i_{0a} = \frac{P_X}{10S_H}, \quad (5.12)$$

где  $P_X$  – потери холостого хода, Вт;  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Реактивную составляющую тока холостого хода определяют по намагничивающей мощности трансформатора  $Q_X$ . Для этого магнитную систему делят на четыре участка – стержни; ярма, за исключением углов магнитопровода; углы и немагнитные зазоры в местах стыков пластин стали стержней и ярм. Намагничивающая мощность  $Q_X$  равна сумме намагничивающих мощностей всех участков.

Намагничивающая мощность  $Q_X$  зависит от магнитных свойств стали магнитной системы. Рассмотренные в разделе 5.2 конструктивные и технологические факторы увеличивают реактивную мощность  $Q_X$  в большей мере, чем потери холостого хода  $P_X$ .

Увеличение намагничивающей мощности учитывают следующими коэффициентами:

1.  $k'_{ТД}$  – коэффициент, учитывающий влияние резки рулона стали на пластины и срезания заусенцев. Для сталей марок 3404, 3405 с отжигом пластин  $k'_{ТД} = 1,2$ ; без отжига пластин –  $k'_{ТД} = 1,55$ .

2.  $k''_{ТД}$  – коэффициент, учитывающий форму сечения ярма, способ прессовки стержней и ярм магнитной системы, расшихтовку и зашихтовку верхнего ярма при насадке обмоток. При мощностях трансформаторов до 630 кВ·А  $k''_{ТД} = 1,06$ ; от 1 000 до 6 300 кВ·А –  $k''_{ТД} = 1,07$ ; 10 000 кВ·А и более –  $k''_{ТД} = 1,15$ .

3.  $k_{ТУ}$  – коэффициент, учитывающий увеличение намагничивающей мощности в углах магнитной системы (табл. 5.9).

4.  $k_{ТПЛ}$  – коэффициент, учитывающий увеличение намагничивающей мощности в углах магнитной системы в зависимости от ширины пластины второго пакета  $a_2$  (табл. 2.3).

Полная намагничивающая мощность, кВ·А,

$$Q_X = k'_{\text{ТД}} k''_{\text{ТД}} q_{\text{С}} (G_{\text{С}} + 0,5 k_{\text{ТУ}} k_{\text{ТПЛ}} G_{\text{У}}) + k'_{\text{ТД}} k''_{\text{ТД}} q_{\text{Я}} (G_{\text{Я}} - 6 G_{\text{У}} + 0,5 k_{\text{ТУ}} k_{\text{ТПЛ}} G_{\text{У}}) + k''_{\text{ТД}} (n_{\text{ЗПР}} q_{\text{ЗПР}} \Pi_{\text{ЗПР}} + n_{\text{ЗКОС}} q_{\text{ЗКОС}} \Pi_{\text{ЗКОС}}), \quad (5.13)$$

где  $G_{\text{С}}$ ,  $G_{\text{Я}}$ ,  $G_{\text{У}}$  – массы стали стержней, ярм и угла магнитопровода, кг;  $q_{\text{С}}$ ,  $q_{\text{Я}}$  – удельные намагничивающие мощности для стали стержней и ярм по табл. 5.11, ВА/кг;  $n_{\text{ЗПР}}$ ,  $n_{\text{ЗКОС}}$  – число прямых и косых стыков пластин стали ярм и стержней для выбранного по рис. 2.3 плана шихтовки магнитопровода;  $q_{\text{ЗПР}}$ ,  $q_{\text{ЗКОС}}$  – удельная намагничивающая мощность для зазоров, определяемая из табл. 5.11 по индукциям  $B_{\text{СПР}}$  в прямых и  $B_{\text{СКОС}}$  косых стыках, В·А/м<sup>2</sup>;  $\Pi_{\text{ЗПР}}$ ,  $\Pi_{\text{ЗКОС}}$  – площадь зазора (стыка) соответственно для прямых и косых стыков, м<sup>2</sup>.

Таблица 5.9

**Значения коэффициента  $k_{\text{ТУ}}$  для стали марок 3404 и 3405 толщиной 0,35 и 0,3 мм при магнитных индукциях от 1,4 до 1,8 Тл и  $f = 50$  Гц**

Число углов		Индукция $B$ , Тл				
с косыми стыками	с прямыми стыками	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
6	–	26,0	27,95	27,95	26,0	22,1
5*	1*	32,25	34,83	35,2	33,25	27,85
4	2	38,5	41,7	42,45	40,5	33,66

Примечание: \* – комбинированный стык по рис. 3, в, г

Таблица 5.10

**Значения коэффициента  $k_{\text{ТПЛ}}$  для холоднокатаной стали**

Индукция $B$ , Тл	Ширина пластины второго пакета $a_2$ , мм							
	50	100	200	300	400	500	600	700
0,8 – 1,0	1,30	1,25	1,20	1,17	1,15	1,14	1,13	1,12
1,1 и 1,9	1,40	1,27	1,21	1,18	1,16	1,15	1,14	1,13
1,2 и 1,8	1,50	1,30	1,22	1,19	1,17	1,16	1,15	1,14
1,3 и 1,7	1,70	1,38	1,25	1,21	1,18	1,17	1,16	1,15
1,4 и 1,6	2,00	1,50	1,35	1,25	1,20	1,19	1,18	1,16
1,5	3,00	2,00	1,50	1,35	1,30	1,25	1,20	1,18

Для прямых стыков площадь зазора в стыке  $\Pi_{\text{ЗПР}}$  равна площади сечения в стержне  $\Pi_{\text{С}}$ , индукцию в стыке  $B_{\text{СПР}}$  можно принять равной индукции в стержне  $B_{\text{С}}$ . Для косых стыков с углом резки пластин 45° площадь зазора в стыке  $\Pi_{\text{ЗКОС}} = \sqrt{2} \Pi_{\text{С}}$ , индукция в стыке  $B_{\text{СКОС}} = B_{\text{С}} / \sqrt{2}$ .

Таблица 5.11

**Полная удельная намагничивающая мощность**

Индукция $B$ , Тл	Намагничивающая мощность $q$ , В·А/кг				$q_3$ , В·А/м <sup>2</sup>	
	марка стали и ее толщина				марка стали	
	3404, 0,35 мм	3404, 0,3 мм	3405, 0,35 мм	3405, 0,30 мм	3404	3405
1,00	0,548	0,540	0,533	0,525	1 000	900
1,20	0,752	0,742	0,732	0,722	4 000	3 700
1,22	0,782	0,768	0,758	0,748	4 680	4 160
1,24	0,811	0,793	0,783	0,773	5 360	4 620
1,26	0,841	0,819	0,809	0,799	6 040	5 080
1,28	0,870	0,844	0,834	0,824	6 720	5 540
1,30	0,900	0,870	0,86	0,850	7 400	6 000
1,32	0,932	0,904	0,892	0,880	8 200	6 640
1,34	0,964	0,938	0,924	0,910	9 000	7 280
1,36	0,996	0,972	0,956	0,940	9 800	7 920
1,38	1,028	1,006	0,988	0,970	10 600	8 560
1,40	1,060	1,040	1,020	1,000	11 400	9 200
1,42	1,114	1,089	1,065	1,041	12 440	10 120
1,44	1,168	1,139	1,110	1,082	13 480	11 040
1,46	1,222	1,188	1,156	1,123	14 520	11 960
1,48	1,276	1,238	1,210	1,161	15 560	12 880
1,50	1,330	1,289	1,246	1,205	16 600	13 800
1,52	1,408	1,360	1,311	1,263	17 960	14 760
1,54	1,486	1,431	1,376	1,321	19 320	15 720
1,56	1,575	1,511	1,447	1,383	20 700	16 800
1,58	1,675	1,600	1,524	1,449	22 100	18 000
1,60	1,775	1,688	1,602	1,526	23 500	19 200
1,62	1,958	1,850	1,748	1,645	25 100	20 480
1,64	2,131	2,012	1,894	1,775	26 700	21 760
1,66	2,556	2,289	2,123	1,956	28 600	23 160
1,68	3,028	2,681	2,435	2,188	30 800	24 680
1,70	3,400	3,073	2,747	2,420	33 000	27 000
1,72	4,480	4,013	3,547	3,080	35 400	28 520
1,74	5,560	4,953	4,347	3,740	37 800	30 840

*Примечание.* В стали  $q$ , В·А/кг, в зоне шихтованного стыка  $q_3$ , В·А/м<sup>2</sup>; для стали марок 3404 и 3405 толщиной 0,35 и 0,3 мм при различных индукциях и  $f=50$  Гц.

Реактивная составляющая тока холостого хода, %,

$$i_{0p} = \frac{Q_x}{10S_H}, \quad (5.14)$$

где  $Q_x$  – полная намагничивающая мощность трансформатора; В·А;  $S_H$  – полная номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Полный ток холостого хода, %,

$$i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2}. \quad (5.15)$$

Полученное значение тока холостого хода не должно отличаться от заданного более чем на  $\pm 15\%$ , (ГОСТ 11677–85).

Здесь изложена упрощенная методика расчета потерь и тока холостого хода. Более точный метод расчета рассмотрен в [1].

Коэффициент полезного действия трансформатора, о.е.,

$$\eta = 1 - \frac{P_x + P_k}{S_H \cdot 10^3 + P_x + P_k}, \quad (5.16)$$

где  $P_x$ ,  $P_k$  – потери короткого замыкания и холостого хода, Вт;  $S_H$  – полная номинальная мощность трансформатора, кВ · А.

## 6. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

### 6.1. Общие сведения о тепловом расчёте

Активную часть трансформатора (магнитопровод с обмотками) устанавливают в стальной бак. Бак закрывают крышкой и заливают трансформаторное масло для лучшего охлаждения обмоток и магнитопровода.

Во время работы в активных частях трансформатора – в обмотках и магнитопроводе – возникают потери, выделяющиеся в виде тепла. С ростом температуры возникает температурный перепад (разность температур) между обмоткой или магнитной системой и трансформаторным маслом. С появлением температурного перепада начинается передача тепла от более нагретой активной части к более холодному маслу.

Вслед за активными частями нагреваются масло и металлический бак и возникает температурный перепад между внешней поверхностью бака и окружающим воздухом. Тепло с поверхности бака передается воздуху путем лучеиспускания и конвекции. С увеличением температуры обмоток и магнитопровода возрастают температурные перепады между активными частями, маслом, баком и окружающим воздухом. Пропорционально температурным перепадам увеличивается количество тепла, отдаваемое воздуху. Когда все выделяющееся в трансформаторе тепло рассеивается в окружающем воздухе, дальнейший нагрев активных частей прекращается. Температуры активных частей и превышения температур не изменяются.

Большинство силовых трансформаторов работают с длительной мало изменяющейся нагрузкой, не превышающей номинальной мощности. Поэтому тепловой расчет трансформаторов выполняют для режима номинальной нагрузки.

*Задача теплового расчета заключается:*

1. В определении перепадов температуры внутри обмоток и магнитной системы и между обмотками, магнитной системой и маслом.
2. В подборе конструкции, размеров бака и системы охлаждения, обеспечивающих нормальную теплоотдачу всех потерь при температурах обмоток, магнитной системы и масла, не превышающих допустимые температуры.
3. В поверочном расчете превышений температуры обмоток, магнитной системы и масла над окружающим воздухом.

Наиболее важен расчет теплового режима обмоток, так как в них выделяется (60–80) % потерь энергии. От температуры обмоток зависит тепловой износ изоляции и, следовательно, срок нормальной эксплуатации трансформатора. Поэтому при практических упрощенных расчетах нахо-

дят средние перепады температур в обмотках, между обмотками и маслом, не определяя перепады температур для магнитопровода.

## 6.2. Тепловой расчет обмоток

Тепловой расчет обмоток начинают с определения внутренних перепадов температур:  $\theta_{O1}$  для обмотки НН и  $\theta_{O2}$  для обмотки ВН.

Подсчет внутреннего перепада температуры в большинстве обмоток из провода прямоугольного сечения упрощается тем, что каждый провод одной или двумя сторонами своего сечения соприкасается с охлаждающим маслом (рис. 6.1). К таким обмоткам относятся обмотки с радиальными охлаждающими каналами (винтовые, непрерывная катушечная) и одно- и двухслойные цилиндрические.

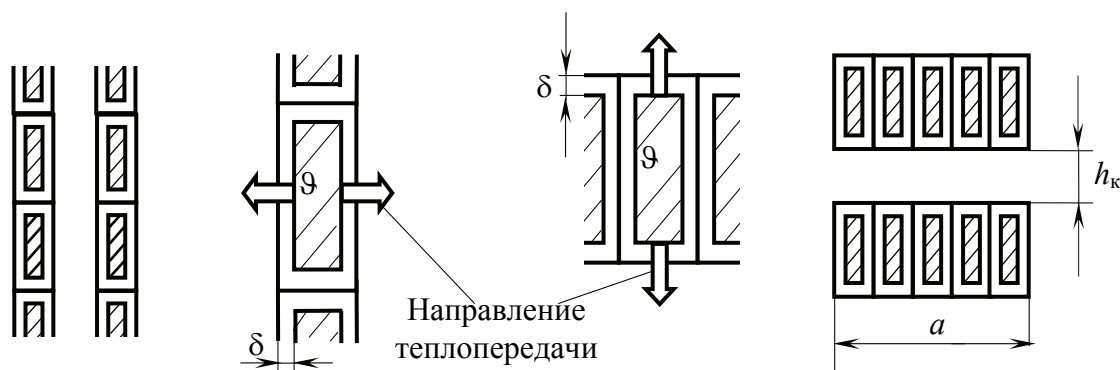


Рис. 6.1. К расчету внутреннего перепада температуры в обмотках

Внутренний перепад температуры в таких обмотках практически равен перепаду в изоляции одного провода, °C,

$$\theta_O = \frac{q \delta}{\lambda_{из}} \cdot 10^{-3}. \quad (6.1)$$

Здесь  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>, на поверхности рассматриваемой обмотки, определяемая в главе 3;  $\delta$  – толщина изоляции провода на одну сторону, мм;  $\lambda_{из}$  – теплопроводность изоляции провода, Вт/(м·°C), по табл. 6.1.

Внутренний перепад температуры в многослойных цилиндрических обмотках из провода круглого или прямоугольного сечения с открытыми поверхностями охлаждения всех катушек обмотки по рис. 6.2, а, б, °C

$$\theta_O = \frac{p a^2}{8 \lambda_{cp}} \cdot 10^{-6}. \quad (6.2)$$

Таблица 6.1

## Удельные теплопроводности изоляционных материалов

Материал	$\lambda_{\text{из}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$
Бумага кабельная сухая	0,12
Бумага кабельная в масле	0,17
Бумага кабельная, пропитанная лаком	0,17
Электроизоляционный картон	0,17
Лакоткани электроизоляционные	0,25

*Примечание.* Теплопроводность электроизоляционных материалов зависит от технологии их обработки. При пропитке, увлажнении и уплотнении внешним давлением теплопроводность увеличивается.

Если обмотка или внутренняя катушка обмотки намотаны непосредственно на изоляционном цилиндре (рис. 6.2, в) и имеют только одну открытую поверхность охлаждения, наиболее нагретая зона сдвигается от центра сечения обмотки в сторону цилиндра на  $0,75a$  от наружной поверхности.

Полный внутренний перепад в этом случае,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$$\theta_0 = 0,28 \frac{p a^2}{\lambda_{\text{CP}}} \cdot 10^{-6}. \quad (6.3)$$

В формулах (6.2), (6.3)  $p$  – удельные потери,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ , в объеме обмотки;  $a$  – радиальный размер катушки по рис. 6.2, мм; если обмотка разделена на две катушки осевым охлаждающим каналом, то  $a$  – радиальный размер более широкой катушки (рис. 6.2, б), мм;  $\lambda_{\text{CP}}$  – средняя теплопроводность обмотки,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

Удельные потери  $p$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ , определяют отношением электрических потерь в проводе единичной длины к объему, занимаемому этим изолированным проводом вместе с междуслойной изоляцией (рис. 6.3):

для обмоток из провода круглого сечения

$$p = K \frac{J^2 d^2}{(d' + \delta_{\text{C}}) d'} \cdot 10^4; \quad (6.4)$$

для обмоток из провода прямоугольного сечения

$$p = K' \frac{J^2 a b}{(a' + \delta_{\text{C}}) b'} \cdot 10^4. \quad (6.5)$$

Здесь  $K = 1,68$ ;  $K' = 2,14$  для медного провода,  $K = 2,71$ ;  $K' = 3,44$  – для алюминиевого;  $J$  – плотность тока в обмотке,  $\text{А}/\text{мм}^2$ ; размеры (рис. 6.3) провода без изоляции  $d$ ,  $a$ ,  $b$  и в изоляции  $d'$ ,  $a'$ ,  $b'$ , мм;  $\delta_{\text{C}}$  – толщина междуслойной изоляции, мм, определена в главе 3.

Средняя теплопроводность  $\lambda_{\text{ср}}$  обмотки, Вт/(м·°С):  
из провода круглого сечения

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda \lambda_{\text{с}} (d' + \delta_{\text{с}})}{\lambda \delta_{\text{с}} + \lambda_{\text{с}} d'}; \quad (6.6)$$

из провода прямоугольного сечения

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda \lambda_{\text{с}} (a' + \delta_{\text{с}})}{\lambda \delta_{\text{с}} + \lambda_{\text{с}} a'}. \quad (6.7)$$

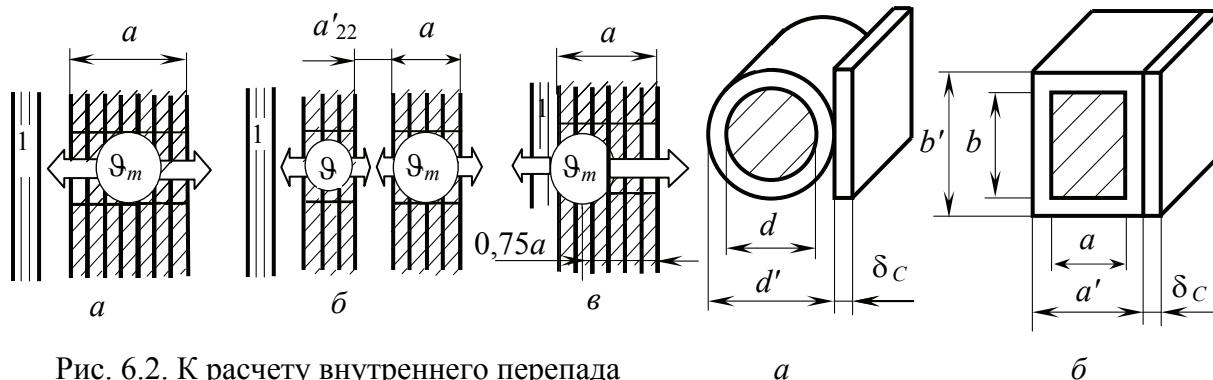


Рис. 6.2. К расчету внутреннего перепада температуры в многослойных обмотках: 1 – изоляционный цилиндр;  $\Theta_m$  – температура наиболее нагретой части обмотки;  $\leftarrow$  – направление теплопередачи

Рис. 6.3. Элемент объема обмотки: а – круглый провод; б – прямоугольный провод

В формулах (6.6), (6.7) теплопроводность междуслойной изоляции  $\lambda_{\text{с}}$ , Вт/(м·°С), по табл. 6.1; средняя условная теплопроводность обмотки  $\lambda$  без учета междуслойной изоляции, Вт/(м·°С):

в обмотках из провода круглого сечения

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{из}}}{0,7 \sqrt{(d' - d)/d}}, \quad (6.8)$$

в обмотках из провода прямоугольного сечения

$$\lambda = \lambda_{\text{из}} \frac{b a'}{2 \delta b'}, \quad (6.9)$$

где  $\lambda_{\text{из}}$  – теплопроводность изоляции провода по табл. 6.1, Вт/(м·°С);  $d, d', a, a', b, b'$  – размеры провода (рис. 6.3), мм;  $2\delta$  – толщина изоляции провода на две стороны, мм, по табл. 2.4, 2.5.

Средний внутренний перепад температуры обмотки, °С,

$$\theta_{\text{оср}} = \frac{2}{3} \theta_0, \quad (6.10)$$

где  $\theta_0$  – внутренний перепад температуры, °С, в обмотке по формулам (6.1)–(6.3).



Перепады температуры  $\theta_{OM1}$ ,  $\theta_{OM2}$  на поверхности обмоток ВН и НН зависят от плотности тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$ , определяемых при расчете обмоток в главе 3. Обычно  $\theta_{OM1}$  и  $\theta_{OM2}$  рассчитывают по проверенным на практике эмпирическим формулам.

Для цилиндрических обмоток из провода прямоугольного или круглого сечения и винтовых обмоток без радиальных (горизонтальных) каналов перепад температуры на поверхности обмотки, °С,

$$\theta_{OM} = 0,285 q^{0,6}. \quad (6.11)$$

Перепад температуры на поверхности винтовых и катушечных обмоток с радиальными (горизонтальными) каналами, °С,

$$\theta_{OM} = 0,35 k_1 k_2 q^{0,6}. \quad (6.12)$$

Здесь  $k_1$  – коэффициент, учитывающий затруднение конвекции масла в каналах внутренних обмоток:  $k_1 = 1$  для обмоток ВН;  $k_1 = 1,1$  для обмоток НН;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий влияние относительной ширины радиального (горизонтального) охлаждающего канала на конвекцию масла,  $k_2$  определяют по табл. 6.2 в зависимости от отношения высоты к глубине канала (ширине обмотки)  $h_K/a$  (рис. 6.1).

Таблица 6.2

**Значения коэффициента  $k_2$  в формуле (6.12)**

$h_K/a$	0,07–0,08	0,08–0,09	0,1	0,11–0,12	0,13–0,14	0,15–0,19	$\geq 0,2$
$k_2$	1,1	1,05	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80

После определения внутреннего и внешнего перепадов температуры для обмоток НН и ВН подсчитывают среднее превышение температуры этих обмоток над средней температурой охлаждающего масла, °С,

$$\theta_{ОМСР} = \theta_{ОСР} + \theta_{ОМ}. \quad (6.13)$$

### 6.3. Тепловой расчет бака трансформатора

Бак трансформатора должен обеспечивать при минимальных внешних размерах хорошую теплоотдачу, позволяющую отвести в окружающую среду все тепло от активных частей трансформатора.

Потери мощности и количество отводимого тепла увеличиваются с номинальной мощностью трансформатора. Вследствие этого с ростом  $S_H$  необходимо увеличивать теплоотдающую поверхность, что достигается усложнением конструкции бака. Тип бака трансформатора с естественной циркуляцией масла выбирают по табл. 6.3.

Таблица 6.3

Типы баков силовых масляных трансформаторов

Тип бака	Пределы применения по мощности, кВ · А
Бак с гладкими стенками	До 25–40
Бак с навесными радиаторами с прямыми трубами	От 100 до 6 300
Бак с навесными радиаторами с гнутыми трубами	От 2 500 до 10 000
Бак с вваренными охлаждающими гнутыми трубами (трубчатый)	От 40 до 1 600

В настоящее время трубчатые баки применяют редко вследствие использования более технологичных баков с навесными радиаторами.

Размеры бака зависят от габаритных размеров активной части и минимально допустимых изоляционных расстояний от обмоток и отводов до стенок бака (рис. 6.4).

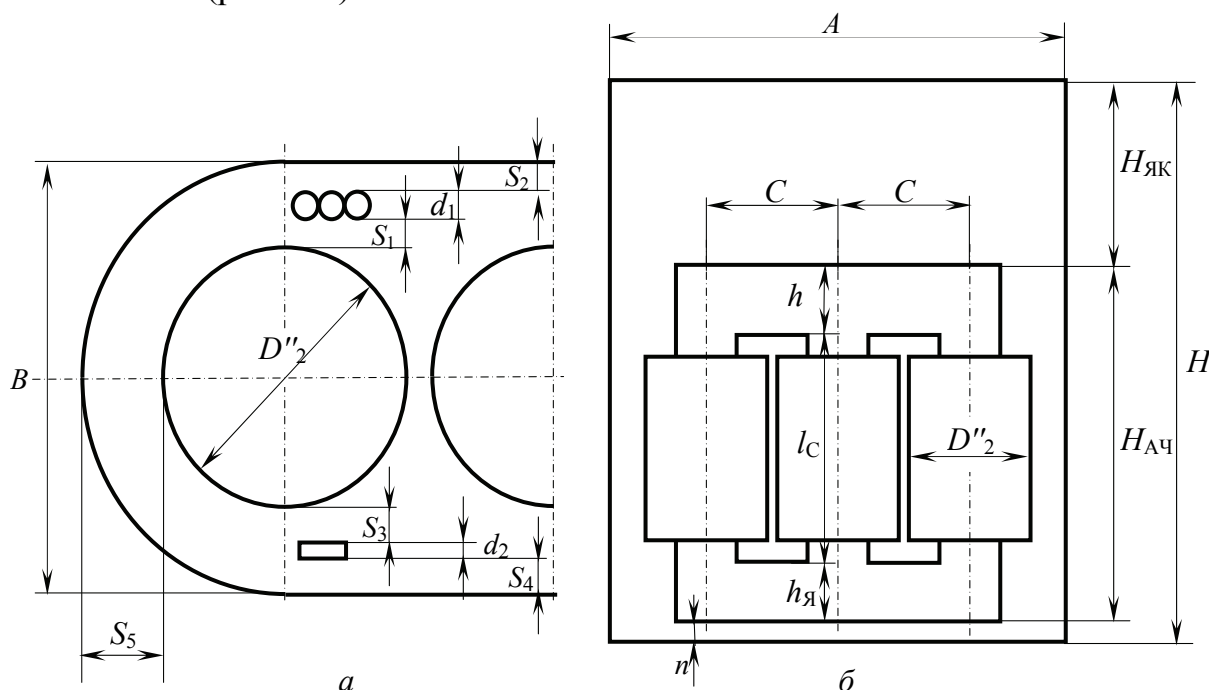


Рис.6.4. К определению основных размеров бака: *а* – изоляционные расстояния и размеры отводов; *б* – размещение активной части трансформатора

По табл. 6.4 определяют необходимые для расчета бака минимальные изоляционные расстояния и размеры отводов (рис. 6.4):

$S_1$  – изоляционное расстояние от изолированного отвода обмотки ВН (внешней) до собственной обмотки и равное ему расстояние  $S_2$  от этого отвода до стенки бака, мм;

$d_1$  – диаметр изолированного отвода ВН, который при классах напряжения до 35 кВ включительно принимается  $d_1 = 20$  мм при мощностях до 10 000 кВ · А и  $d_1 = 25$  мм при больших мощностях;

$S_3$  – изоляционное расстояние от неизолированного или изолированного отвода обмотки НН до обмотки ВН, мм;

$d_2$  – диаметр изолированного отвода обмотки НН, мм, равный  $d_1$  при напряжении обмотки НН 3,15 кВ и более, или размер неизолированного отвода НН (шины), равный (10 – 15) мм при напряжении обмотки до 1 кВ;

$S_4$  – изоляционное расстояние от отвода НН до стенки бака, мм;

$S_5$  – принимают равным  $S_3$  при испытательных напряжениях до 85 кВ или определяют по формуле  $S_5 = S_3 + d_2 + S_4$  (результаты расчета приведены в табл. 4.2).

Таблица 6.4

**Допустимые изоляционные расстояния между отводами, обмоткой ВН и баком, мм**

Изоляционное расстояние, мм, (рис. 6.4)	Толщина изоляции отвода на одну сторону, мм	Испытательное напряжение отвода, кВ			
		до 25	35	55	85
$S_1 = S_2, S_4$	0	25	33	50	–
	2	20	20	32	50
$S_3, S_5$	0	25	33	50	90
	2	20	20	30	50

Минимальные ширина  $B$  и длина  $A$  бака трехфазного трансформатора классов напряжения 6, 10 и 35 кВ (рис. 6.4), м,

$$B = D_2'' + (S_1 + S_2 + d_1 + S_3 + S_4 + d_2) \cdot 10^{-3}; \quad (6.14)$$

$$A = 2C + D_2'' + 2S_5 \cdot 10^{-3}, \quad (6.15)$$

где  $D_2''$  – наружный диаметр обмотки ВН в, м;  $C$  – расстояние между осями стержней, м, по формуле (5.4);  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, d_1, d_2$  – размеры по рис. 6.4, мм.

Общую глубину бака  $H$  определяют по высоте активной части  $H_{АЧ}$  и минимальному расстоянию от верхнего ярма до крышки бака  $H_{ЯК}$ , необходимому для установки и крепления вводов, переключателя регулирования напряжения и отводов.

Высота активной части трансформатора, м,

$$H_{АЧ} = l_C + 2h_{Я} + n \cdot 10^{-3}, \quad (6.16)$$

где  $l_C$  – высота стержня магнитопровода, м;  $h_{Я}$  – высота ярма магнитной системы, равная ширине центрального пакета стали ярма  $a_{1Я}$ , м;  $n$  – толщина подкладки под нижнее ярмо в мм ( $n = 30\text{--}50$  мм).

Минимальное расстояние  $H_{ЯК}$  определяют по табл. 6.5. Обычно найденное по табл. 6.5 значение  $H_{ЯК}$  является достаточным для получения необходимой теплоотдачи бака для трансформатора с полными потерями по

ГОСТ. При необходимости увеличения площади теплоотдачи бака табличное значение  $H_{\text{ЯК}}$  произвольно увеличивают (увеличивают глубину бака).

Таблица 6.5

**Минимальные расстояния от ярма до крышки бака**

Расстояние $H_{\text{ЯК}}$ от ярма до крышки бака, м	Класс напряжения трансформатора, кВ			
	6	10	20	35
	0,16	0,16	0,3	0,4*

*Примечание.* \* – при горизонтальном положении переключателя между ярмом и крышкой бака (реечные переключатели типа ПТР). При вертикальной установке переключателя  $H_{\text{ЯК}} = 0,85$  м (переключатели типа ПТЛ–6, ПТЛ–0–15).

Общая глубина бака  $H$ , м,

$$H = H_{\text{АЧ}} + H_{\text{ЯК}}. \quad (6.17)$$

По найденным размерам бака предварительно определяют поверхность излучения  $\Pi_{\text{И}}'$  и требуемую из условий охлаждения поверхность конвекции  $\Pi_{\text{К}}'$ , исходя из которой рассчитывают систему охлаждения.

Поверхность излучения бака приближенно,  $\text{м}^2$ :

– для бака прямоугольного сечения в плане

$$\Pi_{\text{И}}' = 2(A + B)Hk, \quad (6.18)$$

– для бака овального сечения в плане

$$\Pi_{\text{К}}' = [2(A - B) + \pi B]Hk, \quad (6.19)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $H$  – размеры бака по рис. 6.4, м;  $k$  – коэффициент, учитывающий отношение периметра поверхности излучения к поверхности гладкой части бака и приближенно равный: 1,0 – для гладкого бака; 1,5–2,0 – для бака с навесными радиаторами и 1,2–1,5 – для бака с трубами.

Необходимую поверхность конвекции  $\Pi_{\text{К}}'$  приближенно определяют по потерям мощности и длительно допустимым перепадам температур между обмоткой, маслом, баком и окружающим воздухом при условии, что температура наиболее нагретой обмотки не превысит максимально допустимую для изоляции класса А температуру 105 °С при температуре окружающего воздуха + 40 °С (ГОСТ 11677-85).

При максимально допустимой температуре обмотки 105 °С длительно допустимое среднее превышение температуры обмотки над воздухом при номинальной нагрузке равно 65 °С. Среднее превышение температуры масла, омывающего обмотки, над воздухом должно быть не более, °С,

$$\theta_{\text{МВ}} = 65 - \theta_{\text{ОМСР}}, \quad (6.20)$$

где  $\theta_{\text{ОМСР}}$  – большее из двух значений, подсчитанных для обмоток ВН и НН по формуле (6.13), °С.

Среднее превышение температуры бака над воздухом, °С,

$$\theta_{\text{БВ}} = \theta_{\text{МБ}} - \theta_{\text{МБ}}, \quad (6.21)$$

где  $\theta_{\text{МБ}}$  – перепад температуры, °С, между маслом и стенкой бака (обычно  $\theta_{\text{МБ}}$  не превышает 5–6 °С).

Полученное значение должно удовлетворять неравенству

$$1,2 \cdot (\theta_{\text{БВ}} + \theta_{\text{МБ}}) \leq 60^\circ\text{С}, \quad (6.22)$$

отвечающему требованиям ГОСТ, чтобы превышение температуры верхних слоев масла над воздухом не превышало 60 °С. Если неравенство в формуле (6.22) не удовлетворяется, то следует принять  $1,2 \cdot (\theta_{\text{БВ}} + \theta_{\text{МБ}}) = 60^\circ\text{С}$  и определить значение  $\theta_{\text{БВ}}$ , °С,

$$\theta_{\text{БВ}} = 50 - \theta_{\text{МБ}}. \quad (6.23)$$

Предварительное значение поверхности конвекции бака, м<sup>2</sup>,

$$\Pi'_{\text{К}} = \frac{1,05(P_{\text{К}} + P_{\text{Х}})}{2,5\theta_{\text{БВ}}^{1,25}} - 1,12\Pi'_{\text{И}}. \quad (6.24)$$

Здесь  $P_{\text{К}}$ ,  $P_{\text{Х}}$  – потери короткого замыкания и холостого хода, Вт, по формулам (4.19) и (5.11); поверхность излучения  $\Pi'_{\text{И}}$ , м<sup>2</sup>, по формулам (6.18) или (6.19).

По найденному значению  $\Pi'_{\text{К}}$  определяют вид, число и размеры охлаждающих элементов, которые подбирают так, чтобы их суммарная поверхность конвекции  $\Pi_{\text{К}}$  приблизительно была равна  $\Pi'_{\text{К}}$ .

### 6.3.1. Гладкий бак

Для трансформаторов мощностью до 40 кВ·А включительно применяют гладкие баки. Толщина стенки, дна и крышки такого бака не превышает (3-4) мм. Поверхности конвекции  $\Pi_{\text{КГЛ}}$  и излучения  $\Pi_{\text{ИГЛ}}$  гладкого бака равны его внешней поверхности.

Фактическая поверхность теплоотдачи, м<sup>2</sup>:

– прямоугольного бака

$$\Pi_{\text{КГЛ}} = \Pi_{\text{ИГЛ}} = 2(A + B)H + 0,5\Pi_{\text{КР}}; \quad (6.25)$$

– овального бака

$$\Pi_{\text{КГЛ}} = \Pi_{\text{ИГЛ}} = [2(A - B) + \pi B]H + 0,5\Pi_{\text{КР}}. \quad (6.26)$$

Здесь  $A$ ,  $B$ ,  $H$  – размеры бака (рис. 6.4), м,  $\Pi_{\text{КР}}$  – поверхность крышки бака, м<sup>2</sup>; 0,5 – коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности крышки вводами ВН и НН и различной арматурой.

Поверхность крышки, м<sup>2</sup> :  
– прямоугольного бака

$$\Pi_{\text{кр}} = AB ; \quad (6.27)$$

– овального бака

$$\Pi_{\text{кр}} = [(A - B)B + \frac{\pi}{4}B^2], \quad (6.28)$$

в формулах (6.27), (6.28) все размеры в м.

Если фактическая поверхность конвекции  $\Pi_{\text{КГЛ}}$  меньше  $\Pi'_{\text{к}}$ , необходимой по условиям охлаждения, можно увеличить поверхность конвекции, увеличив высоту бака  $H$  (в разумных пределах).

После окончательного определения размеров бака и поверхностей теплоотдачи  $\Pi_{\text{КГЛ}}$  и  $\Pi_{\text{ИГЛ}}$  следует выполнить поверочный расчет превышений температуры обмоток и масла (подпункт 6.3).

### 6.3.2. Бак с навесными радиаторами

Поверхность теплоотдачи такого бака образована в основном развитой поверхностью радиаторов и значительно больше, чем в гладких и трубчатых баках.

Радиатор (рис. 6.5, 6.6) состоит из двух коллекторов (стальных коробок), в которые вварены верхними и нижними концами трубы.

Таблица 6.6

Основные данные радиаторов с прямыми трубами по рис. 6.5

Размер $A$ , м	Поверх- ность $\Pi_{\text{КТР}}$ , $\text{м}^2$	Масса, кг		Размер $A$ , м	Поверх- ность $\Pi_{\text{КТР}}$ , $\text{м}^2$	Масса, кг	
		стали	масла			стали	мас ла
С одним рядом труб				1,4	4,333	53,94	46
0,71	0,746	12,9	8,5	1,615	4,961	67,14	53
0,9	0,958	15,35	10,9	1,8	5,613	73,94	57
С двумя рядами труб				2,0	6,253	81,98	64
0,71	2,135	34,14	24	2,2	6,893	89,18	72
0,9	2,733	41,14	30	2,4	7,533	95,68	78
1,115	3,533	50,14	38				

*Примечание.* 1.  $\Pi_{\text{КТР}}$  - поверхность конвекции труб; поверхность конвекции двух коллекторов  $\Pi_{\text{КК}} = 0,15 \text{ м}^2$  при одном ряде труб,  $\Pi_{\text{КК}} = 0,34 \text{ м}^2$  при двух рядах труб.

2. Минимальное расстояние осей фланцев радиатора от нижнего и верхнего срезов бака  $c_1$  и  $c_2$  соответственно 0,085 и 0,10 м.

Радиатор присоединяют к баку трансформатора фланцами своих коллекторов или приваркой патрубков коллектора к стенке бака (допустимо при  $S_{\text{Н}} = 100\text{--}250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ).

Таблица 6.7

## Основные данные трубчатых радиаторов по рис. 6.6

Размер $A$ , м	Одинарный радиатор			Двойной радиатор		
	поверхность $P_{КТР}, м^2$	масса, кг		поверхность $P_{КТР}, м^2$	масса, кг	
		стали	масла		стали	масла
1,880	11,45	205	161	22,9	380	276
2,000	12,1	215	169	24,15	401	291
2,285	13,55	236	184	27,05	442	321
2,485	14,55	249	194	29,1	468	341
2,685	15,6	264	204	31,15	499	362
3,000	17,2	285	219	34,35	540	393
3,250	18,45	302	232	36,9	575	418
3,750	21	337	258	42,0	644	469
4,000	22,3	352	269	44,6	675	492
4,250	24,6	373	284	47,2	716	521

*Примечание.* 1. Поверхность конвекции двух коллекторов одинарного радиатора  $P_{КК} = 1,44 м^2$ , двойного  $P_{КК} = 1,32 м^2$ .

2. Расстояние от оси патрубка коллектора до дна  $c_1$  и крышки  $c_2$  бака не менее 0,17 м.

В трансформаторах мощностью от 100 до 6 300 кВ·А используют радиаторы с прямыми вертикальными трубами овального сечения с размерами овала 72×20 мм и толщиной стенки трубы 1,5 мм (рис. 6.5). Они выпускаются с одним рядом труб по 7 труб в ряду и с двумя рядами по 10 труб в ряду. Основные данные радиаторов приведены в табл. 6.6.

Для радиатора с одним рядом труб размеры  $B$  и  $C$  (см. рис. 6.5) равны 354 и 158 мм, для радиатора с двумя рядами труб – 505 и 253 мм соответственно.

В трансформаторах мощностью 2 500 кВ·А и выше применяют двойные трубчатые радиаторы из четырех рядов труб круглого сечения, по 16, 18, 20, 22 трубы в ряду, изогнутых по концам и вваренных в два прямоугольных коллектора (рис. 6.6) или одинарные с двумя рядами труб (по 16 труб в ряду), вваренными только с одной стороны коллекторов. Общее число труб у одинарного радиатора равно 32, у двойных радиаторов соответственно 64, 72, 80, 88. При изготовлении радиаторов используют трубы диаметром 51 мм и толщиной стенки 1,6 или 1,75 мм. Удельная теплоотдача с поверхности таких радиаторов выше, чем у радиатора с прямыми трубами, но конструкция менее технологична.

Основные данные нормальной серии одинарных и двойных радиаторов с изогнутыми трубами по рис. 6.6 приведены в табл. 6.7.

При подборе радиаторов следует определить по высоте бака  $H$  основной присоединительный размер  $A$  (расстояние между осями патрубков или центрами фланцев коллекторов радиатора). Размер  $A$  (рис. 6.5 или рис. 6.6) определяют из неравенства  $A \leq H - (c_1 + c_2)$ , где  $c_1$  и  $c_2$  – мини-

мальные расстояния центров фланцев радиатора соответственно от нижнего и верхнего срезов бака. Для радиаторов с прямыми трубами по рис. 6.5  $c_1 = 0,085$  м,  $c_2 = 0,10$  м (табл. 6.6); с изогнутыми трубами по рис. 6.6  $c_1 = c_2 = 0,17$  м (табл. 6.7).

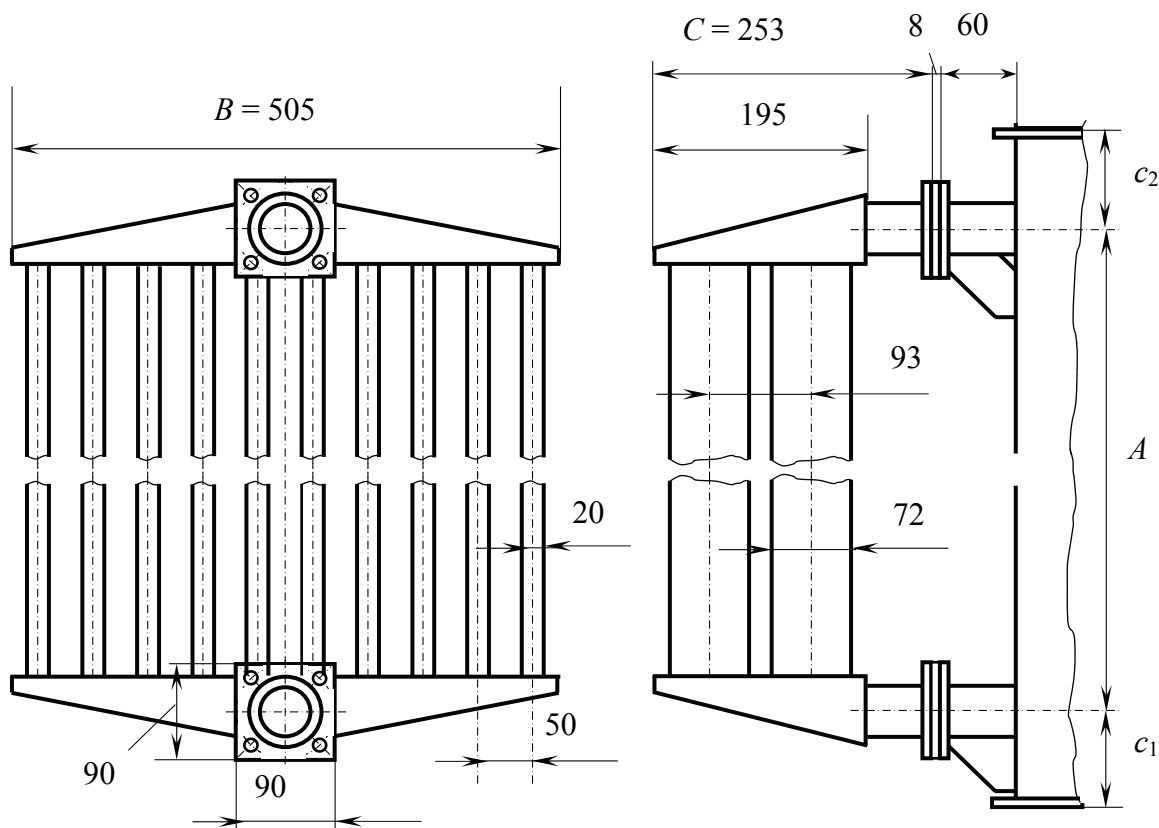


Рис. 6.5. Трубчатый радиатор с двумя рядами прямых труб

Определив размер  $A$ , следует выбрать радиатор по табл. 6.6 или табл. 6.7 и определить поверхность конвекции радиатора, приведенную к поверхности гладкой стенки,  $m^2$ ,

$$\Pi_{\text{КРАД}} = k_{\Phi} \Pi_{\text{КТР}} + \Pi_{\text{КК}}, \quad (6.29)$$

где  $\Pi_{\text{КТР}}$ ,  $\Pi_{\text{КК}}$  – поверхности конвекции труб и двух коллекторов,  $m^2$ , по табл. 6.6 или табл. 6.7;  $k_{\Phi}$  – коэффициент, учитывающий улучшение теплоотдачи конвекцией радиатора по сравнению с вертикальной гладкой стенкой. Для радиаторов с прямыми трубами (рис. 6.5)  $k_{\Phi} = 1,26$ . Для радиаторов с гнутыми трубами (рис. 6.6)  $k_{\Phi} = 1,4$ ;

Необходимая поверхность конвекции всех радиаторов,  $m^2$ ,

$$\Pi'_{\text{КР}} = \Pi'_{\text{К}} - \Pi_{\text{КГЛ}}, \quad (6.30)$$

где  $\Pi'_{\text{К}}$  – необходимая поверхность конвекции,  $m^2$ , по формуле (6.24);  $\Pi_{\text{КГЛ}}$  – поверхность конвекции гладкого бака,  $m^2$ , по формулам (6.25), (6.26).



Необходимое по условиям охлаждения число радиаторов

$$n_p = \frac{\Pi'_{кр}}{\Pi_{кРАД}} \quad (6.31)$$

округляют до большего целого числа.

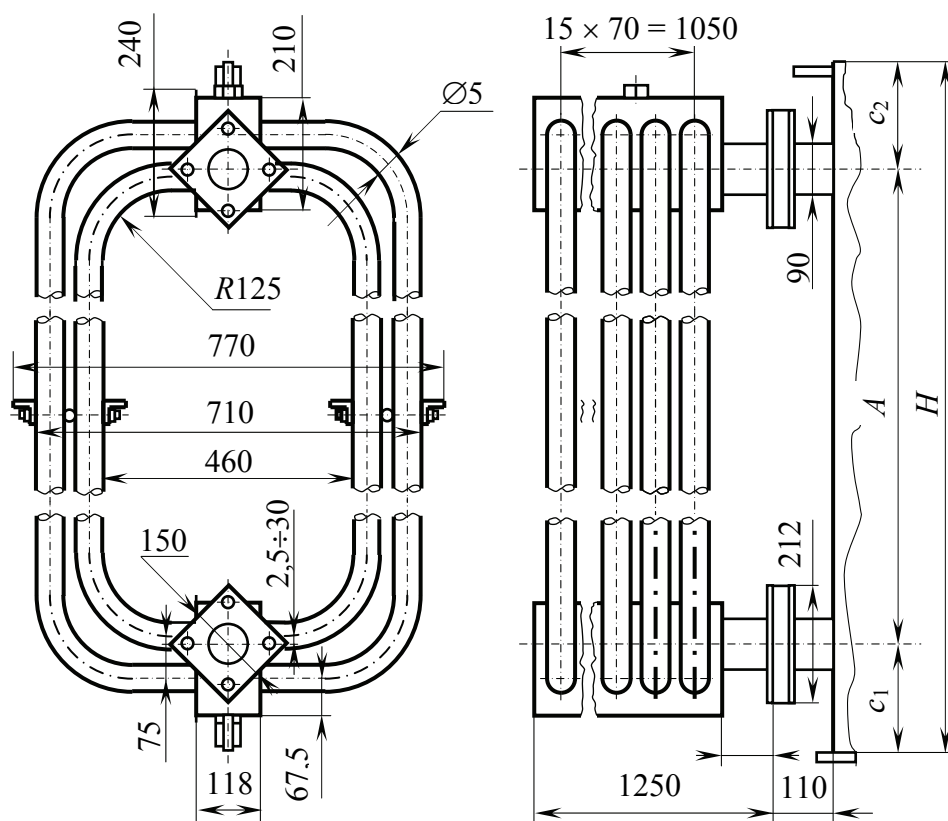


Рис. 6.6. Двойной трубчатый радиатор с числом труб  $2 \times 2 \times 16 = 64$

Следует оценить возможность размещения полученного числа радиаторов  $n_p$  по периметру бака, учитывая что в случае установки радиаторов на баке минимальные промежутки между трубами соседних радиаторов:

- при параллельном расположении коллекторов – 160 мм для двойных и 100 мм для одинарных радиаторов;
- при размещении коллекторов под углом – 100 мм для двойных радиаторов и 70 мм для одинарных.

Если радиаторы невозможно разместить на баке, следует скорректировать размеры бака и радиаторов в сторону увеличения поверхности теплоотдачи. Обычно увеличивают высоту бака  $H$ , размер  $A$  радиатора или выбирают другой тип радиатора с большей поверхностью охлаждения, после чего по формулам (6.24), (6.29), (6.30), (6.31) уточняют требуемую поверхность конвекции  $\Pi'_{кр}$  и число радиаторов  $n_p$ . Корректировку размеров

бака и радиаторов продолжают до получения допустимого по условиям размещения на баке числа радиаторов  $n_p$ .

Фактическая поверхность конвекции бака с навесными радиаторами,  $m^2$ ,

$$\Pi_K = \Pi_{KGL} + n_p \Pi_{KPAD}, \quad (6.32)$$

где все обозначения и размерности физических величин соответствуют принятым при расчетах по формулам (6.27), (6.28), (6.29).

Значение  $\Pi_K$  должно быть равно или немного превышать  $\Pi'_K$ , предварительно найденное по формуле (6.24). В противном случае следует увеличить число радиаторов и уточнить фактическую поверхность конвекции  $\Pi_K$ .

Поверхность излучения бака с навесными радиаторами,  $m^2$ ,

$$\Pi_I = k[2(A - B) + \pi B]H + 0,5\Pi_{KP}. \quad (6.33)$$

Здесь  $k = 1,5-2,0$  – коэффициент, учитывающий отношение периметра поверхности излучения бака с радиаторами к поверхности гладкой части бака; в (6.33) все размеры в м.

После окончательного определения размеров бака и поверхностей охлаждения  $\Pi_K$  и  $\Pi_I$  выполняют поверочный расчет превышений температуры обмоток и масла (подпункт 6.3).

## 6.4. Расчет превышений температуры обмоток и масла

Среднее превышение температуры стенки бака над температурой окружающего воздуха,  $^{\circ}C$ ,

$$\theta_{БВ} = \left[ \frac{1,05(P_X + P_K)}{2,8\Pi_I + 2,5\Pi_K} \right]^{0,8}, \quad (6.34)$$

где  $P_X, P_K$  – потери холостого хода и короткого замыкания, Вт;  $\Pi_K, \Pi_I$  – фактические поверхности конвекции и излучения, рассчитанные по формулам (6.25), (6.26) или (6.32), (6.33) для принятой конструкции бака,  $m^2$ .

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой стенки бака,  $^{\circ}C$ ,

$$\theta_{МБ} = 0,165 \left[ \frac{1,05(P_X + P_K)}{\Pi_K} \right]^{0,6}. \quad (6.35)$$

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха,  $^{\circ}C$ ,

$$\theta_{МВВ} = 1,2(\theta_{БВ} + \theta_{МБ}). \quad (6.36)$$

Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха подсчитывают отдельно для обмоток ВН и НН, °С,

$$\theta_{ОВ} = \theta_{ОСР} + \theta_{ОМ} + \theta_{МБ} + \theta_{БВ}. \quad (6.37)$$

Полученные значения превышения температуры обмоток и масла в верхних слоях над окружающим воздухом согласно ГОСТ 11677-85 должны удовлетворять следующим неравенствам:

$$60^{\circ} \leq \theta_{ОВ} \leq 65^{\circ} \text{С}; \quad (6.38)$$

$$55^{\circ} \leq \theta_{МВВ} \leq 60^{\circ} \text{С}. \quad (6.39)$$

При значениях  $\theta_{ОВ}$ ,  $\theta_{МВВ}$  больше верхних границ неравенств (6.38), (6.39), соответственно, увеличивают поверхность охлаждения бака.

При значениях  $\theta_{ОВ}$  и  $\theta_{МВВ}$  меньше нижних границ неравенств (6.38), (6.39), соответственно, поверхность охлаждения бака уменьшают.

После изменения размеров бака повторяют тепловой расчет бака и превышений температур (подпункты 6.2, 6.3). Корректировку размеров бака и системы охлаждения повторяют до достижения значений  $\theta_{ОВ}$  (для обмоток ВН и НН) и  $\theta_{МВВ}$ , удовлетворяющих неравенствам (6.38), (6.39).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии «Проектирование трансформаторов» представлены сведения, позволяющие произвести расчет и сконструировать трансформатор на достаточно высоком уровне. Разработаны варианты расчета трансформаторов, определены объем пояснительной записки и графической части проекта. Показана возможность применения современной компьютерной техники при выполнении расчетной и графической части проекта. Приведены методики расчета обмоток ВН и НН различных типов, с необходимыми пояснениями их выбора, магнитной системы, потерь мощности холостого хода и короткого замыкания, механических сил в обмотках, теплового расчета, позволяющие перейти к конструированию трансформаторов с масляным охлаждением.

Представлены сведения о магнитных материалах для изготовления сердечников трансформаторов, таблицы сортаментов обмоточных проводов круглого и прямоугольного сечения, изоляционных материалов для конструирования главной изоляции.

Серьезное внимание уделено системам масляного охлаждения и методике расчета баков различных типов в зависимости от мощности трансформатора.

Для возможности построения листов графической части в приложениях приводятся общий вид трансформатора, остов трансформатора в собранном виде и установка обмоток; вводы ВН и НН, пример выполнения схемы регулирования напряжения.

Библиографический список содержит все источники, необходимые для грамотного проведения курсового проектирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
2. Стандарт организации: Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности СТО 4.2–07–2010. – Красноярск : ИПК СФУ, 2010. – 56 с.
3. Силин, Л. Ф. Электрические машины. Конструирование магнитопроводов силовых трансформаторов / Л. Ф. Силин, С. И. Мурашкин. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. – 82 с.
4. Сергеенков, Б. Н. Электрические машины: Трансформаторы : учеб. пособие / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова. – М. : Высш. шк., 1989. – 352 с.
5. Силин, Л. Ф. Электромеханика. Вспомогательное оборудование масляных трансформаторов / Л. Ф. Силин, С. И. Мурашкин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2007. – 111 с.
6. Гурский, Д. А. Вычисления в MathCAD / Д. А. Гурский. – Минск: Новое знание, 2003. – 814 с.
7. Встовский, А. Л. Проектирование трансформаторов / А. Л. Встовский, С. А. Встовский, Л. Ф. Силин. – Красноярск : КГТУ, 2000. – 112 с.

## Приложение 1

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Институт

---

Кафедра

### КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ТРАНСФОРМАТОР ТМ .... / ....

Руководитель

---

Подпись, дата

---

Должность, ученая степень

---

Инициалы, фамилия

Студент

---

Номер группы

---

Номер зачетной книжки

---

Подпись, дата

---

Инициалы, фамилия

Красноярск 20\_

ЗАДАНИЕ № .... НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ТРАНСФОРМАТОРА  
студенту гр. .... факультета

.....  
(Фамилия, имя, отчество)

Выполнить расчет и конструктивную разработку трансформатора со следующими данными:

1. Тип трансформатора .....
2. Число фаз .....
3. Частота напряжения сети ..... Гц.
4. Номинальная мощность ..... кВ·А.
5. Номинальное напряжение обмотки ВН ..... В.
6. Номинальное напряжение обмотки НН ..... В.
7. Схемы и группа соединения обмоток.....
8. Система охлаждения – с естественной циркуляцией масла и воздуха (естественное масляное).
9. Режим работы – длительная нагрузка.
10. Установка .....

Параметры трансформатора

1. Напряжение короткого замыкания ..... %.
2. Потери короткого замыкания ..... Вт.
3. Ток холостого хода ..... %.
4. Потери холостого хода ..... Вт.

Спроектированный трансформатор должен соответствовать требованиям государственных стандартов: ГОСТ 11677–85; ГОСТ 12022–76; ГОСТ 11920–85.

Дополнительные условия

1. Сталь электротехническая марки .....
2. Обмотки из ..... провода

<b>Из</b>	<b>Лист</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Подп.</b>	<b>Дата</b>	<b>Трансформатор ТМ ... /...</b>	<b>Лит.</b>	<b>Лист</b>	<b>Листов</b>
<b>Разраб.</b>								
<b>Проверил</b>								
<b>Н.контр.</b>						<b>Кафедра ЭТКиС</b>		
<b>Утверд.</b>								

# Приложение 3

Таблица

## Задания для курсовых проектов

№ задания	Номинальная мощность, $S_H$ , кВт·А	$U_{НЛ}$ ВН, кВ	$U_{НЛ}$ НН, кВ	Схемы и группа соединения обмоток	Потери, кВт		$u_K$ , %	$i_0$ , %	Допустимый материал обмоток	
					х. х., $p_0$	к. з., $p_K$			медь	алюминий
00 01	63	6 10	0,4	У/У <sub>Н</sub> – 0	0,24	1,28	4,5	2,8	Нет	Да
02 03 04	100	6 10 35	0,4	У/У <sub>Н</sub> – 0	0,33 0,33 0,42	1,97	4,5 4,5 6,5	2,6	Нет	Да
05 06 07 08 09 10	160	6 10 35 6 10 20	0,4 0,69	У/У <sub>Н</sub> – 0 Д/У <sub>Н</sub> – 11	0,51 0,51 0,62 0,51 0,51 0,62	2,65 2,65	4,5 4,5 6,5 4,5 4,5 6,5	2,4	Нет	Да
11 12 13 14 15 16	250	6 10 35 6 10 20	0,4 0,69	У/У <sub>Н</sub> – 0 Д/У <sub>Н</sub> – 11	0,74 0,74 0,9 0,74 0,74 0,9	3,7 3,7	4,5 4,5 6,5 4,5 4,5 6,5	2,3	Нет	Да
17 18 19 20 21 22	400	6 10 35 6 10 35	0,4 0,69	У/У <sub>Н</sub> – 0 Д/У <sub>Н</sub> – 11	0,95 0,95 1,2 0,95 0,95 1,2	5,5 5,9	4,5 4,5 6,5 4,5 4,5 6,5	2,1	Нет	Да
23 24 25 26 27 28	630	6 10 35 6 10 35	0,4 0,69	У/У <sub>Н</sub> – 0 Д/У <sub>Н</sub> – 11	1,31 1,31 1,6 1,31 1,31 1,6	7,6 8,5	5,5 5,5 6,5 5,5 5,5 6,5	2,0	Нет	Да
29 30 31 32 33 34 35 36	1 000	6 6 10	0,4 0,4 0,69 0,525 3,15 6,3 0,4 0,69	У/У <sub>Н</sub> – 0 Д/У <sub>Н</sub> – 11 Д/У <sub>Н</sub> – 11 У/Д – 11 Д/У <sub>Н</sub> – 11	2,1 2,1	12,2 12,2 11,6 11,6 12,2	5,5	1,4	Да	Да



Продолжение таблицы

№ зада- ния	Номинальная мощность, $S_H$ , кВт·А	$U_{НЛ}$ ВН, кВ	$U_{НЛ}$ НН, кВ	Схемы и груп- па соединения обмоток	Потери, кВт		$u_K$ , %	$i_0$ , %	Допустимый материал об- моток		
					х. х., $p_0$	к. з., $p_K$			медь	алю- миний	
37	1 000	10	0,525	У / Д – 11	2,1	12,2	5,5	1,4	Да	Да	
38			3,15	У / Д – 11	2,1	11,6					
39			6,3								
40			10,5								
41		20	0,4 0,69	Д / У <sub>Н</sub> – 11	2,0	12,2	6,5	1,4			
42				У / Д – 11	2,0	11,6					
43											6,3 10,5
44											
45		35	0,4 0,69	У / У <sub>Н</sub> – 0	2,0	12,2	6,5	1,4			
46				У / Д – 11	2,0	11,6					
47											3,15 6,3 10,5
48											
49											
50	1 600	6	0,4 0,69	Д / У <sub>Н</sub> – 11	2,8	18,0	5,5	1,3	Да	Да	
51			У / Д – 11	2,8	16,5						
52						3,15 6,3					
53											
54		10	0,4 0,69	Д / У <sub>Н</sub> – 11	2,8		18,0	6,5			1,3
55				У / Д – 11	2,8	16,5					
56							3,15 6,3				
57											
58		20	0,4 0,69	Д / У <sub>Н</sub> – 11	2,75	18,0		6,5			1,3
59				У / Д – 11	2,75	16,5					
60							0,4 0,69				
61											
62		35	0,4 0,69	У / У <sub>Н</sub> – 0	2,75	18,0		6,5			1,3
63				У / Д – 11	2,75	16,5					
64							3,15 6,3 10,5				
65											
66											
67	2 500	6	0,4 0,69	Д / У <sub>Н</sub> – 11	3,9	25,0	5,5	1,0	Да	Да	
68			У / Д – 11	3,9	23,5						
69						0,4 0,69					
70											
71		10	0,4 0,69	Д / У <sub>Н</sub> – 11	3,9		25,0	6,5			1,3
72				У / Д – 11	3,9	23,5					
73							3,15 6,3				
74											

№ зада- ния	Номинальная мощность, $S_H$ , кВт·А	$U_{НЛ}$ ВН, кВ	$U_{НЛ}$ НН, кВ	Схемы и группа соединения обмоток	Потери, кВт		$u_K$ , %	$i_0$ , %	Допустимый материал об- моток			
					х. х., $p_0$	к. з., $p_K$			медь	алю- миний		
75	2 500	10	10,5	У/Д – 11	3,9	23,5	5,5	1,0	Да	Да		
76		20	0,69	Д/У <sub>Н</sub> – 11	3,9	26,0	6,5	1,0				
77			6,3	У/Д – 11	3,9	23,5						
78			10,5									
79			0,69	У/У <sub>Н</sub> – 0	3,9	26,0						
80		35	3,15									
81			6,3	У/Д – 11	3,9	23,5						
82			10,5									
83	4 000	6	3,15	У/Д – 11	5,2	33,5	7,5	0,9	Да	Да		
84		10	6,3									
85			3,15	У/Д – 11	5,2	33,5						
86			6,3									
87		20	6,3	У/Д – 11	5,3	33,5					7,5	0,9
88			10,5									
89		35	3,15									
90			6,3	У/Д – 11	5,3	33,5						
91		10,5										
92	6 300	10	3,15				7,5	0,9	Да	Да		
93			6,3	У/Д – 11	7,4	46,5		0,8				
94			10,5									
95		20	6,3	У/Д – 11	7,6	46,5						
96			10,5									
97		35	3,15									
98			6,3	У/Д – 11	7,6	46,5						
99			10,5									

## Приложение 4

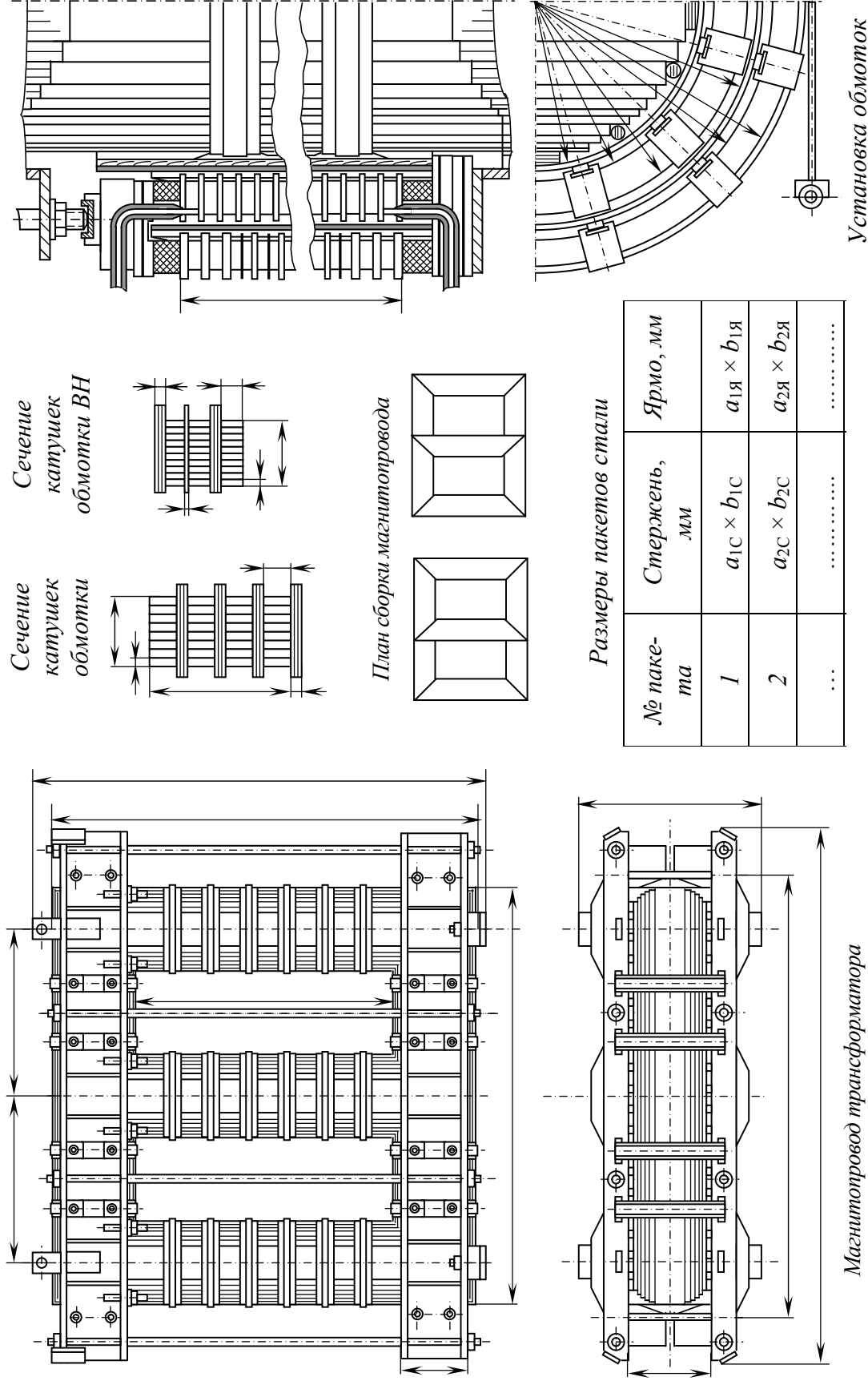
Таблица

### График выполнения курсового проекта

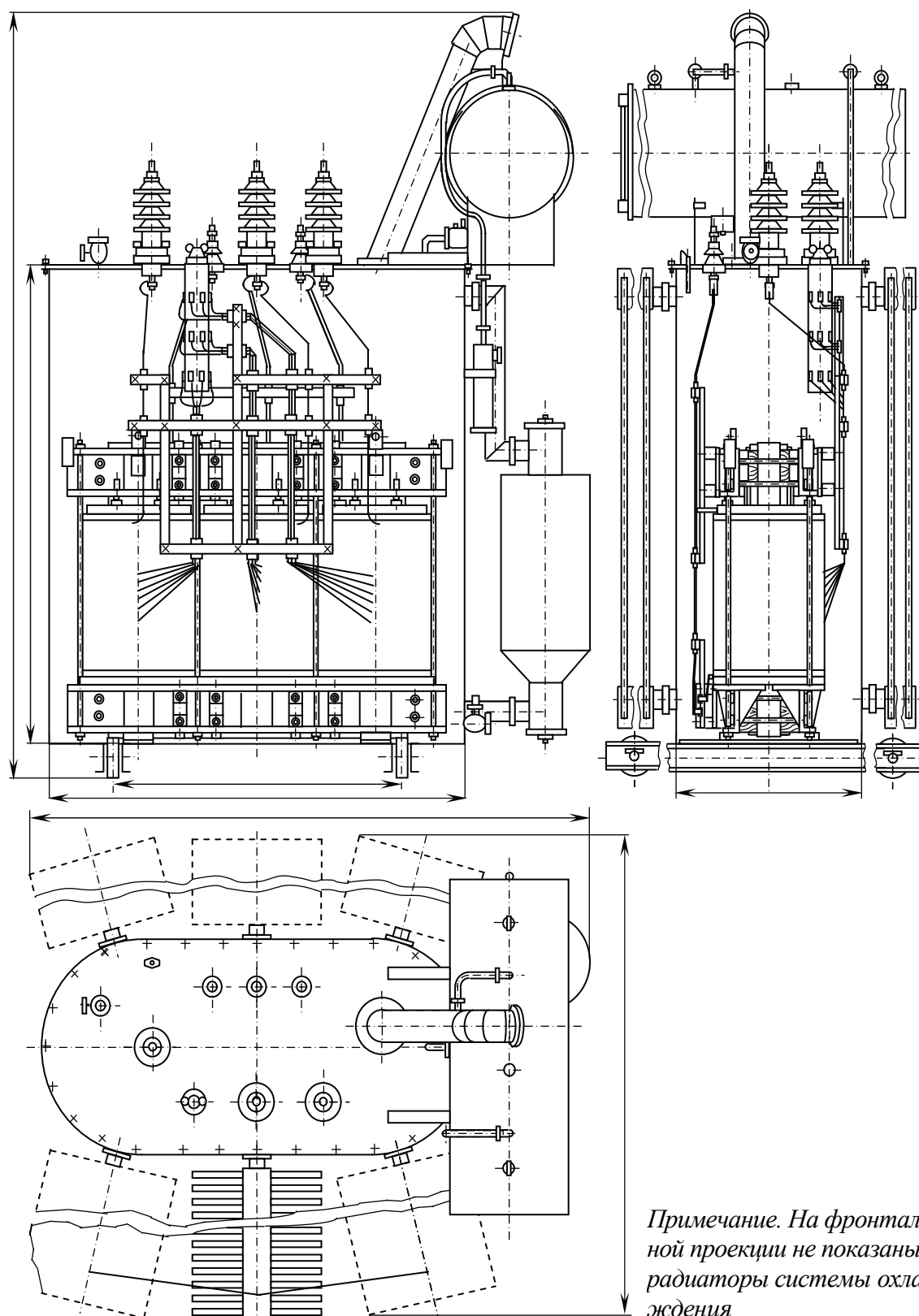
Номер этапа	Наименование этапа проекта	Оценка этапа, %	Всего, %	Срок вы- полнения
1	Определение основных электрических величин и основных размеров	10	10	
2		10	20	
3	Расчёт обмоток ВН и НН	10	30	
4	Расчёт параметров короткого замыкания	10	40	
5	Определение размеров магнитопровода, потерь и тока холостого хода	10	50	
6		5	55	
7		15	70	
8	Тепловой расчёт трансформатора	20	90	
9	Оформление пояснительной записки	10	100	
	1-й лист			
	2-й лист			
	3-й лист			

Задание выдано «.....» ..... Г.

Приложение 5



## Приложение 6



Общий вид трансформатора

# Приложение 7

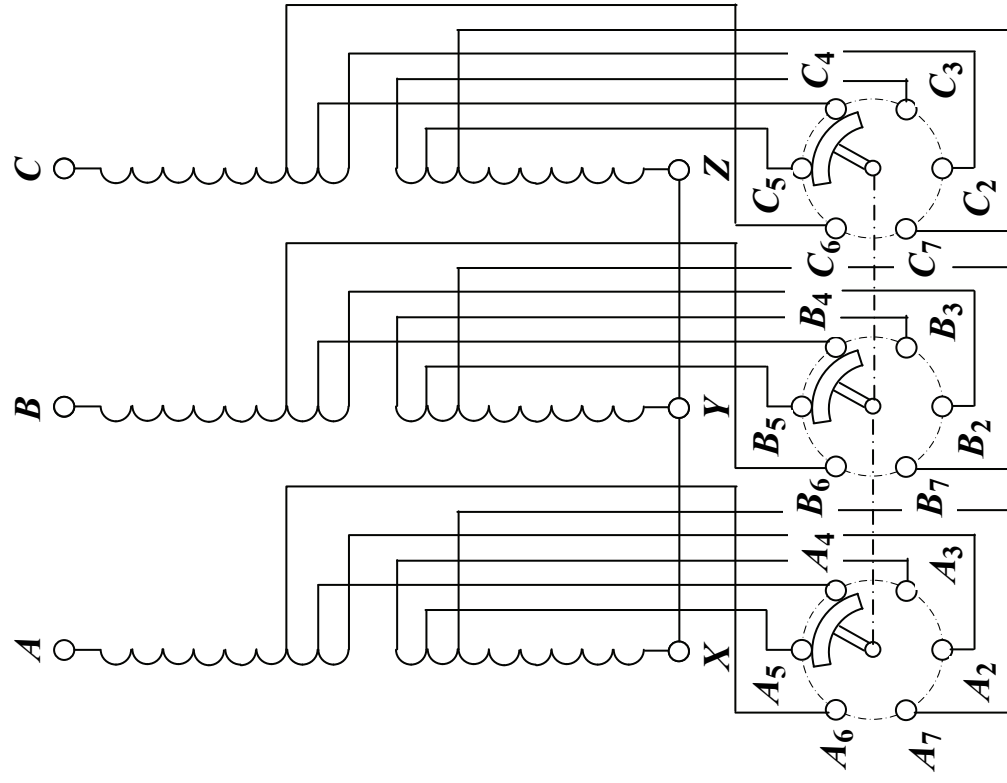
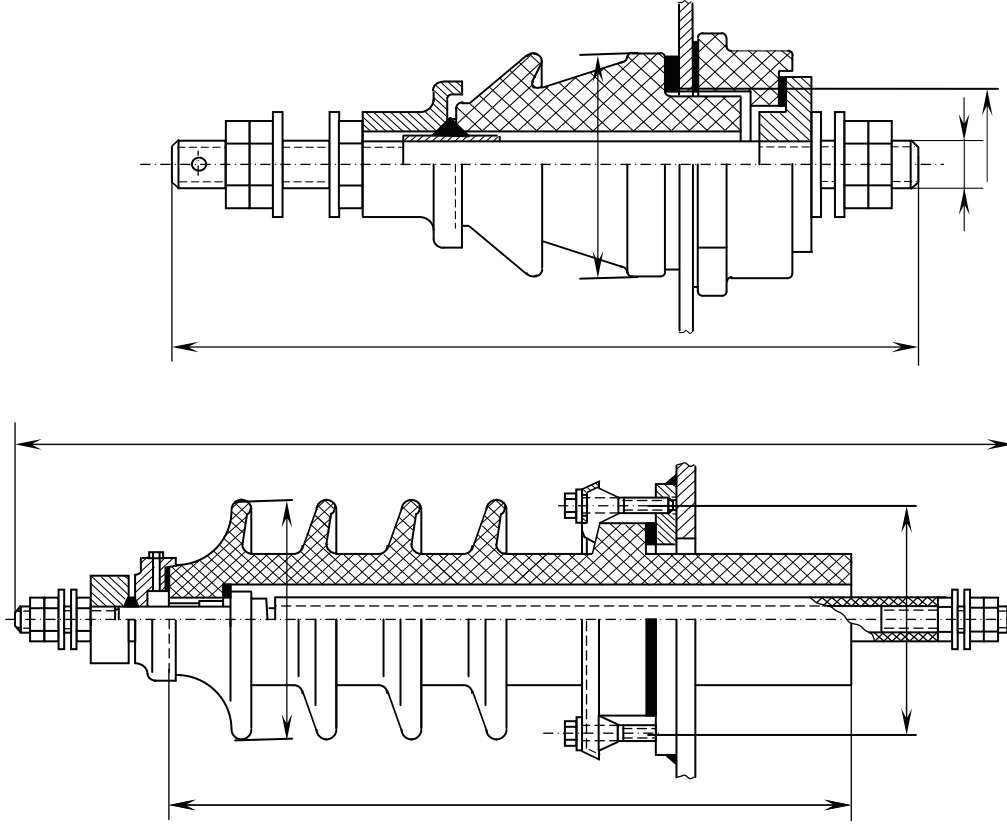


Схема регулирования напряжения



## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СОСТАВ КУРСОВОГО ПРОЕКТА. АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	5
1.1. Состав курсового проекта и общие рекомендации.....	5
1.2 Применение программы Mathcad при проектировании трансформаторов и алгоритм выполнения курсового проекта	7
2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ТРАНСФОРМАТОРА.....	16
2.1. Расчёт основных электрических величин.....	16
2.2. Выбор материала и конструкции магнитной системы.....	17
2.3. Выбор материала и конструкции обмоток.....	22
2.4. Определение размеров главной изоляции обмоток.....	32
2.5. Определение диаметра стержня и высоты обмоток.....	34
3. РАСЧЁТ ОБМОТОК НН и ВН.....	37
3.1. Общие сведения.....	37
3.2. Расчёт обмоток НН.....	40
3.2.1. Общие вычисления для любого типа обмоток.....	40
3.2.2. Расчёт двухслойной цилиндрической обмотки из провода прямоугольного сечения.....	41
3.2.3. Расчёт винтовой обмотки.....	44
3.3. Расчёт обмоток ВН.....	50
3.3.1. Общие вычисления для всех типов обмоток.....	50
3.3.2. Расчёт многослойной цилиндрической обмотки из провода круглого сечения.....	52
3.3.3. Расчёт многослойной цилиндрической обмотки из провода прямоугольного сечения.....	55
3.3.4. Расчёт непрерывной катушечной обмотки.....	58
4. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....	64
4.1. Определение потерь короткого замыкания.....	64
4.2. Расчёт напряжения короткого замыкания.....	67
4.3. Определение механических сил в обмотках и нагрева обмоток при коротком замыкании.....	70

5. РАСЧЁТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРА.....	77
5.1. Определение размеров и массы магнитной системы.....	77
5.2. Определение потерь холостого хода трансформатора.....	85
5.3. Определение тока холостого хода трансформатора.....	87
6. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРА.....	92
6.1. Общие сведения о тепловом расчёте.....	92
6.2. Тепловой расчёт обмоток.....	93
6.3. Тепловой расчёт бака трансформатора.....	96
6.3.1. Гладкий бак.....	100
6.3.2. Бак с навесными радиаторами.....	101
6.4. Расчёт превышений температуры обмоток и масла.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.....	117



Учебное издание

**Встовский** Алексей Львович  
**Встовский** Сергей Алексеевич  
**Силин** Леонид Федорович  
**Полошков** Николай Евгеньевич

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Учебное пособие

Редактор *Н. А. Варфоломеева*  
Компьютерная верстка *Н. Г. Дербенёвой*

Подписано в печать 26.09.2013. Печать плоская. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 500 экз. Заказ № 0886

Издательский центр  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
Тел/факс (391) 206-21-49, e-mail: [rio@lan.kras.ru](mailto:rio@lan.kras.ru)

Отпечатано Полиграфическим центром  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел/факс (391) 206-26-67, 206-26-49  
E-mail: [print\\_sfu@mail.ru](mailto:print_sfu@mail.ru); <http://lib.sfu-kras.ru>