

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.М. Игнатович, Т.В. Усачева

РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЧАСТИ И ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2011

УДК 621.314.222.6(075.8)

ББК 31.261.8я73

И265

Игнатович В.М.

И265 Расчет активной части и оценка эксплуатационных свойств силового трансформатора: учебное пособие / В.М. Игнатович, Т.В. Усачева; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011.- 84с.

В учебном пособии излагаются рекомендации по выполнению расчета активной части и оценке эксплуатационных свойств силового трансформатора. Тщательно проанализирован многолетний опыт курсового проектирования, в результате усилена эксплуатационная составляющая, что позволило улучшить практическую роль этого вида учебной деятельности.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.314.222.6 (075.8)

ББК 31.261.8я73

Рецензенты

Кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники и автоматики ТГАСУ
В.М. Педиков

Кандидат технических наук,
заместитель директора по технике
ОАО «Томский электромеханический завод»
В. В. Големгрейн

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2011

© Игнатович В.М., 2011

© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее чаще всего две индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока. Силовые трансформаторы изменяют только значения переменного напряжения и тока, являются неотъемлемой составляющей электротехнических установок, а также энергетических систем передачи и распределения электроэнергии.

Выполнение курсового проекта на тему «Расчет активной части и оценка эксплуатационных свойств силового трансформатора» формирует навыки конструкторской работы, помогает понять и осознать материал лекционных и лабораторных занятий. Расчеты, проводимые при курсовом проектировании, дают достоверные ответы на многочисленные вопросы пытливого студента, приучают анализировать и обосновывать принимаемые решения.

Расчет активной части проводится в последовательности, соответствующей схеме расчетов, представленной в [1, с.95, 96]. Кроме соблюдения правильной последовательности выполняемых расчетов, схема ориентирует на предварительное изучение конкретных глав и параграфов. Проверить освоение теоретического материала можно путем осмысления приведенных примеров расчетов. Если решения, принимаемые в примере расчета, вам понятны, то можно приступать к выполнению одноименного раздела курсового проекта. В противном случае, нужно вернуться к более тщательному изучению теоретического материала и проконсультироваться у руководителя проекта.

Анализируя примеры расчетов, контролируйте, соответствуют ли они принятым вами решениям по конструкции магнитной системы, материалу обмоток, типу обмоток. Пользуясь таблицами, обращайтесь внимание на примечания к ним, где указываются особенности расчетов трансформаторов с разными системами охлаждения, типами обмоток и т.д. Это позволит избежать досадных ошибок и принять квалифицированные решения.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Курсовой проект – учебная работа, содержащая результаты выполнения задачи, сформулированной по учебной дисциплине, состоит из текстовой документации (пояснительной записки) и графического материала (сборочного чертежа активной части силового трансформатора).

Пояснительная записка – научно-технический документ, содержащий систематизированные данные о выполненной студентом проектной работе, описывающий процесс ее выполнения и полученные результаты в виде текста и необходимых иллюстраций.

Пояснительная записка должна включать в указанной ниже последовательности:

- титульный лист (Приложение 1);
- бланк задания (Приложение 2);
- содержание;
- введение;
- основную часть (расчет активной части и оценка эксплуатационных свойств);
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4.

Содержание должно отражать все материалы работы, представляемые к защите. Слово «СОДЕРЖАНИЕ» записывают в виде заголовка, симметрично тексту, прописными буквами. В содержании перечисляют заголовки разделов, подразделов, каждое приложение и указывают номера листов (страниц), на которых они начинаются. В конце содержания перечисляют графический материал, представляемый к защите, с указанием: «На отдельных листах».

Введение содержит краткое изложение назначения и роли силовых трансформаторов в энергосистемах, современные тенденции в конструировании и производстве трансформаторов, назначение проектируемого трансформатора, общие и технические требования государственных стандартов.

Основная часть содержит шесть первых разделов схемы расчета трансформатора, изложенной на с.95 и 96 [1], и результаты оценки эксплуатационных свойств [5,6].

Заключение должно содержать краткие выводы по результатам выполненной работы, оценку полноты решения поставленных задач, рекомендации по конкретному использованию результатов работы. Заголовок «ЗАКЛЮЧЕНИЕ» пишут с абзаца прописными буквами.

Список использованных источников содержит все источники, на которые имеются ссылки в пояснительной записке. Источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте пояснительной записки арабскими цифрами без точки. Заголовок «СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ» записывают симметрично тексту прописными буквами.

Приложения рекомендуется формировать из материалов иллюстрационного и вспомогательного характера, в частности: таблицы и рисунки большого формата; дополнительные расчеты; самостоятельные материалы и документы конструкторского, технологического и прикладного характера. Приложения, содержащие дополнительные текстовые конструкторские документы (спецификацию) следует помещать в приложение в последнюю очередь.

Сборочный чертеж – общий вид активной части трансформатора в трех проекциях. Проставляются габаритные и установочно-присоединительные размеры, позиции сборочных единиц, деталей, стандартных изделий. Записываются основные технические требования.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

[1, гл. 3 и 4]

Определение линейных и фазных токов, напряжений обмоток высокого (ВН) и низкого (НН) напряжений, как правило, не вызывает особых затруднений. Необходимо учесть, что в бланке задания указаны номинальные линейные напряжения обмоток. Схемы соединения обмоток могут быть указаны в задании записью в виде дроби: в числителе условное обозначение схемы для обмотки ВН, а в знаменателе для обмотки НН. Если схемы соединения обмоток не заданы, то их необходимо обосновать из стандартных (табл.1.8, с.43), приняв решение для питания какой нагрузки (силовой или бытовой, силовой и бытовой) будет предназначен трансформатор.

Испытательные напряжения обмоток промышленной частоты (50 Гц) определяются по табл. 4.1, с.169, по классу напряжения обмоток. Классом напряжения обмотки называют ее длительно допустимое рабочее напряжение (номинальное линейное), он совпадает с номинальным напряжением электрической сети, в которую включается обмотка. Классом напряжения трансформатора считают класс напряжения обмотки ВН.

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания определяются по (3.9) и (3.10), соблюдая размерности величин.

2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА [1, гл. 2, 3 и 4]

Диаметр окружности d , в которую вписано ступенчатое сечение стержня магнитной системы (в дальнейшем – диаметр стержня), осевой размер l (высота) фаз обмоток, средний диаметр витков одноименных фаз обмоток (средний диаметр осевого канала между этими фазами) d_{12} , высота стержня l_c , расстояние между осями соседних стержней C называют основными размерами трансформатора.

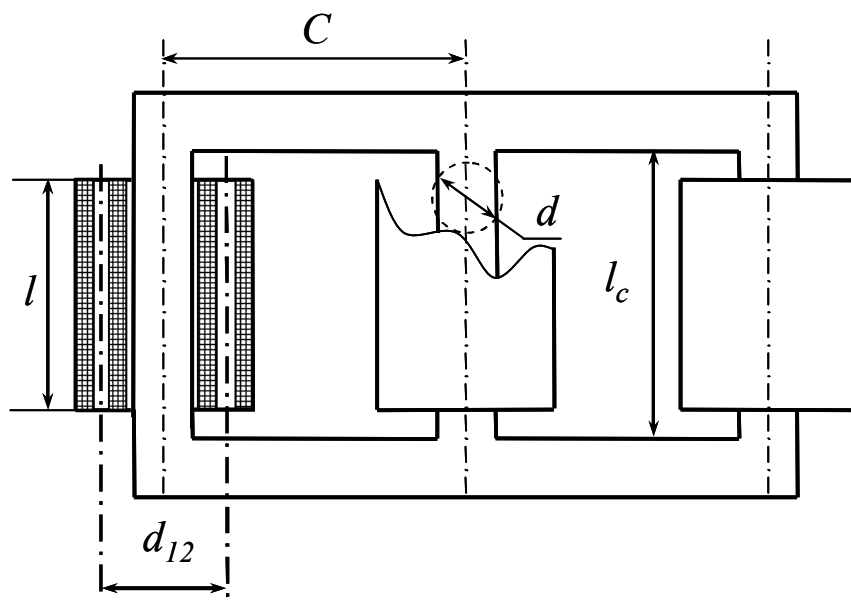


Рис.1. Основные размеры трансформатора

При выборе конструкции и технологии изготовления магнитной системы необходимо принять во внимание, что в задании на проект даны исходные данные реальных силовых трансформаторов со стержневой магнитной системой. Это вносит определенные ограничения при осуществлении выбора решений по магнитной системе.

Выбор будет заключаться в том, какие стыки и в каком количестве иметь магнитной системе и как ее шихтовать: в одну или в две пластины. Выбор марки и толщины листов электротехнической стали нужно сделать, сравнивая свойства горячекатаных и холоднокатаных сталей.

Преимущество здесь за холоднокатаными анизотропными сталями, они имеют меньшие значения удельных потерь и удельных намагничивающих мощностей, большие значения рекомендуемой индукции в стержне. Это позволяет получить магнитную систему более компактную, уменьшить расход материалов.

Делая окончательный выбор марки и толщины листов стали, обратите внимание на перечень марок и толщин листов в таблицах гл. 8, чтобы не было затруднений с поиском информации по электромагнитным свойствам выбранной стали.

Материалом обмоток могут быть выбраны либо медь, либо алюминий. Обоснование можно сформулировать, используя сравнения этих металлов по физическим, электрическим и др. свойствам. При этом необходимо помнить, что рационально спроектированный трансформатор с алюминиевыми обмотками существенно отличается по основным размерам от трансформатора с медными обмотками. Магнитная система трансформатора с алюминиевыми обмотками имеет меньший диаметр стержня, большую высоту стержня и большую площадь окна магнитной системы. Алюминиевые обмотки имеют несколько большие сечения и числа витков.

Предварительный выбор типа обмоток НН и ВН делается по табл. 5.8, с.258. Перечисленные типы обмоток имеют главное и возможное применение, достоинства и недостатки. Рекомендуется начать выбор типа обмотки, во-первых, по главному применению. Во-вторых, проверить, соответствуют ли отобранные по главному применению типы обмоток требованиям по классу напряжения, мощности трансформатора, току на стержень (фазному току). В-третьих, если выбор не завершен, то сделать его на основании сравнения основных достоинств и недостатков оставшихся претендентов. Окончательный же выбор типа и более подробной конструкции обмоток НН и ВН будет сделан позднее, при выполнении их расчетов, принимая во внимание, кроме выше названных требований, сечения витков и плотности теплового потока на поверхности обмоток.

Выбор конструкции и размеров основных изоляционных расстояний главной изоляции обмоток делается по табл. 4.4, с.183 (обмотка НН), табл. 4.5, с.184 (обмотка ВН). Иллюстрацию главной изоляции обмоток НН и ВН выполняйте, беря за основу рис. 4.6, так чтобы конструкция главной изоляции соответствовала проектируемому трансформатору. Если при пользовании табл. 4.4 и 4.5 имеет место несовпадение строк таблицы, в которые попадают мощность трансформатора и испытательное напряжение обмотки, то выбор минимальных изоляционных

расстояний делается по строке, соответствующей испытательному напряжению.

Особое внимание следует обратить на Примечание 1 к табл. 4.5. При мощности трансформатора менее 10000 кВА независимо от испытательного напряжения обмотки ВН для всех разновидностей цилиндрических обмоток минимальное изоляционное расстояние $a_{12} = 27 \cdot 10^{-3}$, м. При классе напряжения цилиндрической обмотки 20 и 35 кВ под внутренним слоем обмотки устанавливается изолированный с обеих сторон металлический электростатический экран общей толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м.

Предварительный расчет и обоснование основных размеров трансформатора, соотношения между ними можно выполнять обобщенным или ускоренным методами.

Обобщенный метод подробно излагается в §§ 3.4-3.7. В результате нужно получить наиболее простой в производстве трансформатор, требующий наименьших затрат при изготовлении, надежный в эксплуатации и соответствующий содержанию задания и требованиям Государственных стандартов.

Эта задача решается расчетами в виде табл. 3.8 или 3.9, наполнение которых делается с использованием полученных основных коэффициентов: A , A_1 , A_2 , B_1 и т. д. По результатам расчетов строят зависимости

$$P_0, i_0, J, \sigma_p, d = f(\beta),$$

где P_0, i_0 - потери и ток холостого хода, соответственно кВт и %; J - плотность тока в обмотках, МА/м²; σ_p - механическое растягивающее напряжение в проводе обмотки, МПа; d - диаметр стержня, м; β - коэффициент экономичности (соотношение основных размеров трансформатора), рекомендуемые пределы его варьирования даны в табл. 12.1, с. 504.

Названные пять зависимостей позволят наглядно обосновать предварительные значения диаметра стержня d , коэффициента экономичности β с помощью рисунка подобного, но несколько измененного, рис. 3.13а или 3.13б, с.151, в соответствии с выбранным металлом обмоточных проводов.

В верхней части этого рисунка нужно изобразить шкалу аргумента функций – коэффициента β с такими же значениями, как в таблице с результатами расчетов. В нижней части рисунка изображается шкала стандартных значений диаметра стержня, которые принимает функция $d = f(\beta)$ в рекомендуемых пределах варьирования коэффициента эконо-

номичности. Силовые трансформаторы могут иметь только стандартные значения диаметров стержня, приведенные на с.87-89.

Четыре строчки рисунка соответствуют четырем анализируемым функциям. Каждая из строчек может иметь заштрихованный участок (или два участка), если на интервале варьирования коэффициента β функция принимает значения, соответствующие комментарию правого крайнего столбца.

Если рисунок в первой и (или) второй строчках не содержит незаштрихованного участка, то причин этого может быть несколько. Во-первых, возможна ошибка в расчетах функций $P_0 = f(\beta)$ и (или) $i_0 = f(\beta)$. Поэтому целесообразно сначала проверить правильность расчетов. Во-вторых, возможно для магнитной системы используется листовая электротехническая сталь с недостаточно высокими электромагнитными свойствами. Повторите расчет этих функций с применением лучшей электротехнической стали. В третьих, конструкция магнитной системы содержит слишком большое количество прямых стыков. Скорректируйте вариант шихтовки по рис. 2.17, с.80, уменьшив количество прямых стыков или используя только косые стыки. В-четвертых, возможно принято слишком большое значение индукции в стержне. Уменьшите индукцию в стержне в соответствии с рекомендациями табл. 2.4, с.78.

Рисунок в третьей или четвертой строчках может содержать незаштрихованные участки.

Выбор диаметра стержня d и соответствующего ему коэффициента экономичности β возможен не только в пределах незаштрихованных участков четырех строчек рисунка. Объясняется это тем, что расчетные значения потерь и тока холостого хода могут превышать заданные, соответственно на $\leq +7,5\%$ и $\leq +15\%$. Это позволяет выбирать диаметр стержня в заштрихованных участках первой и второй строчек рисунка.

Немаловажно при выборе диаметра стержня учитывать следующее: чем меньше диаметр стержня, тем меньше масса электротехнической стали для магнитной системы; чем больше диаметр стержня, тем меньше масса металла обмоток. Это необходимо принять во внимание при минимизации массы электротехнической стали или металла обмоточного провода.

Выбранный диаметр стержня, как правило, не превышает ориентировочного по табл. 2.5, с.82 и 83, а также может быть меньше, но не на много (первый, в крайнем случае, второй стандартный в меньшую сторону от ориентировочного).

Для выбранного диаметра стержня уточните аналитически значение коэффициента экономичности β , используя формулу $d = A\sqrt[4]{\beta}$. Затем рассчитайте, или определите графически, остальные предварительные значения основных размеров трансформатора и другие его параметры, как это сделано на с.153.

Ускоренный метод расчета основных размеров трансформатора отличается от обобщенного тем, что его использование не требует расчета пяти выше названных зависимостей и построения рисунка подобного рис.3.13а и 3.13б.

3. РАСЧЕТ ОБМОТОК НН и ВН **[1, гл. 5 и 6]**

Внимательно ознакомьтесь с гл.5, это позволит избежать досадных ошибок при расчете обмоток. Расчет обмоток трансформатора начинается с обмотки НН, располагаемой между стержнем и обмоткой ВН.

Число витков на фазу обмотки НН округляется до ближайшего целого числа и может быть как четным, так и нечетным. Округление числа витков можно делать, не придерживаясь известного математического правила.

После округления числа витков уточняются напряжение одного витка и индукция в стержне. Индукция в стержне должна по-прежнему остаться в диапазоне рекомендуемых значений табл. 2.4., с.78. Если же этого не выполнено, то вернитесь к округлению числа витков и скорректируйте прежнее решение.

Дальнейшие указания по расчету обмоток зависят от конкретного типа проектируемой обмотки и поэтому даются в виде обособленных подразделов.

3.1. Расчет двухслойных и однослойных цилиндрических обмоток из прямоугольного провода

Эта обмотка применяется для трансформаторов мощностью S_H до 630 кВА включительно. Число слоев обмотки зависит от мощности S_H трансформатора. При мощности на один стержень до 6-10 кВА обмотка может быть намотана в один слой. Число слоев обмотки обычно равно двум, в редких случаях - трем (у более мощных трансформаторов).

После обоснования числа слоев обмотки рассчитайте число витков в слое, которое может быть целым или дробным. Для выбора прямоугольного провода, которым будет выполняться обмотка, нужно определить ориентировочные значения двух параметров: осевого размера витка $h'_{\epsilon 1}$ и его сечения Π'_1 .

При расчете ориентировочного осевого размера витка используется предварительное значение высоты обмоток, как одного из основных размеров трансформатора. При определении ориентировочного сечения витка используется предварительное значение средней плотности тока, полученное по аналитическому выражению, если она соответствует практически применяемым плотностям токов табл. 5.7, с.257. При несоответствии расчетной средней плотности тока практически применяемой, ориентировочное сечение определяется по практически применяемой плотности тока, как достоверной. Это позволит избежать грубых ошибок.

По ориентировочным значениям $h'_{\epsilon 1}$ и Π'_1 подбирают подходящий провод с обязательным соблюдением шести правил, перечисленных на с.266, 267.

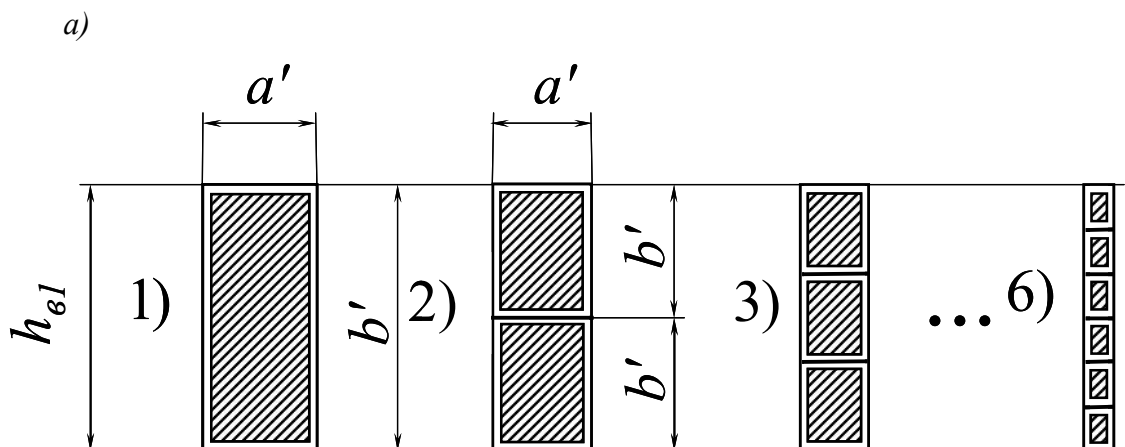
Рассматриваемые варианты решений при выборе прямоугольного провода представлены на рис. 2 и 5. Учитывая преимущества намотки плашмя перед намоткой на ребро, этому способу необходимо отдать предпочтение.

При намотке плашмя первый вариант решения соответствует фазному проводу, состоящему из одного элементарного, с сечением близким к ориентировочному сечению витка. Большой размер изолированного провода b' должен быть максимально близким к ориентировочному осевому размеру витка $h'_{\epsilon 1}$. Ориентировочное значение большего размера неизолированного провода находим как $b \approx h'_{\epsilon 1} - 2\delta$, где 2δ - толщина изоляции провода на две стороны.

Толщина изоляции провода имеет номинальное значение и значение, указанное в скобках, которым и нужно пользоваться при расчетах размеров катушек. Определить толщину витковой изоляции можно воспользовавшись табл. 4.6.

Отыскиваем в табл. 5.2, с.212, значение размера провода, ближайшее к найденному b . Если такой размер имеется, то в строке таблицы,

соответствующей ему, осуществляем поиск сечения фазного провода близкого ориентировочному сечению витка, т. е. $\Pi_1'' \approx \Pi_1'$.



б)

$\begin{matrix} a \\ b \end{matrix}$	...	...	...	...	...	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">...</div>	...	...
...
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">...</div>	...	...	...	...	...	Π_1''	...	...
...

Рис.2. Выбор размеров прямоугольного провода при намотке плашмя:
а - варианты решений; б - схема пользования таблицей

Для реально существующего первого варианта решения уточненное значение сечения витка Π_1 будет равно табличному: $\Pi_1 = \Pi_1''$. Уточненный осевой размер витка $h_{с1}$ будет равен большему размеру изолированного провода $h_{с1} = b' = b + 2\delta$.

Для второго варианта решения сечение витка состоит из двух элементарных проводов. Ориентировочное значение большего размера элементарного изолированного провода должно быть максимально близким к половине ориентировочного осевого размера витка $h_{с1}'$. Если имеется табличное значение близкое, но не превышающее больший размер неизолированного элементарного провода, то в строке, соответствующей ему, осуществляем поиск сечения провода близкого половине ориентировочного сечения витка. И если такое сечение имеется, то решение найдено. Уточненное сечение витка составит $\Pi_1 = 2\Pi_1''$, а уточ-

ненный осевой размер витка будет равен двойной величине большего размера изолированного элементарного провода $h_{e1} = 2b'$.

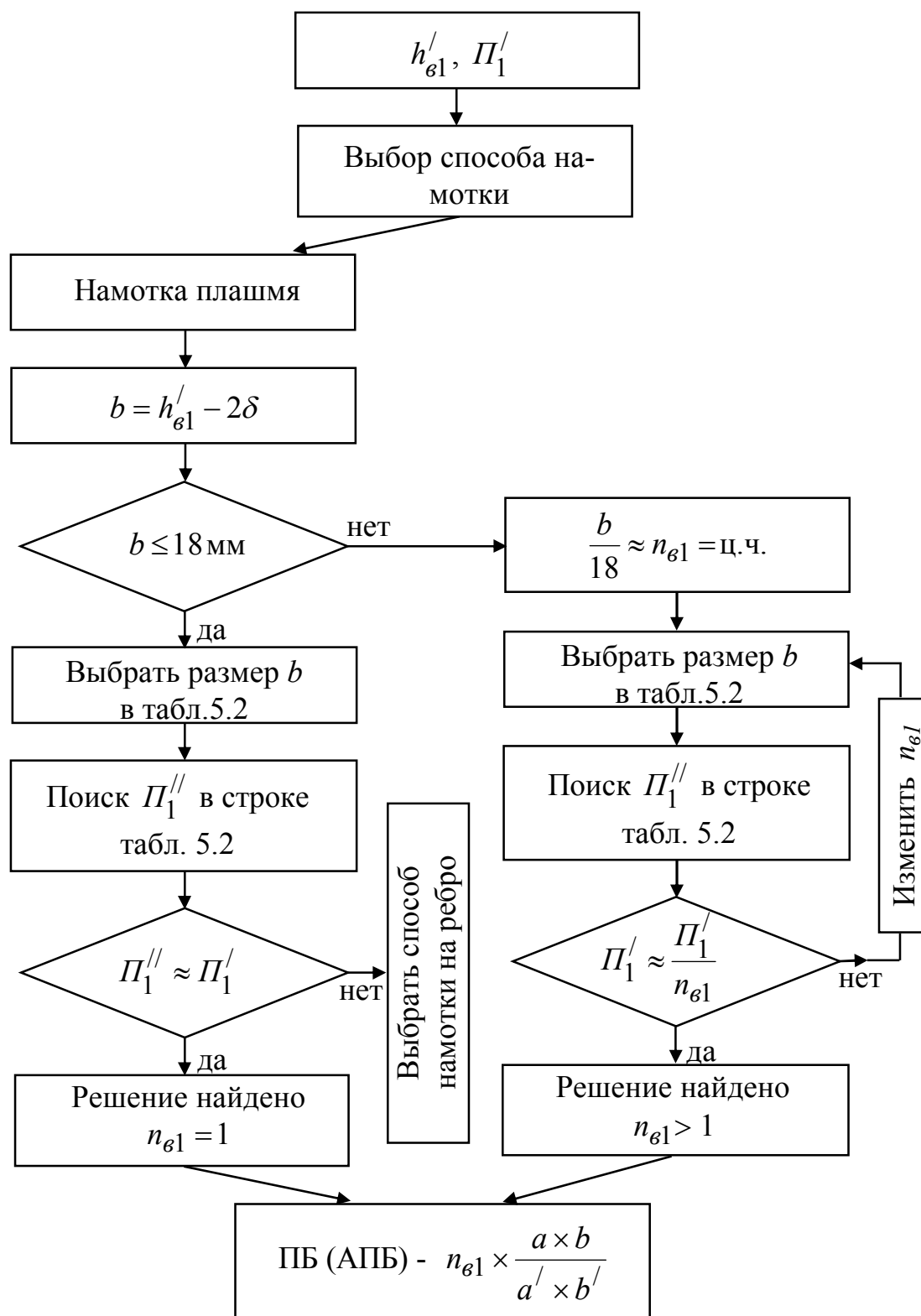


Рис. 3. Блок-схема выбора размеров прямоугольного провода при намотке плашмя одно- двухслойной цилиндрической обмотки

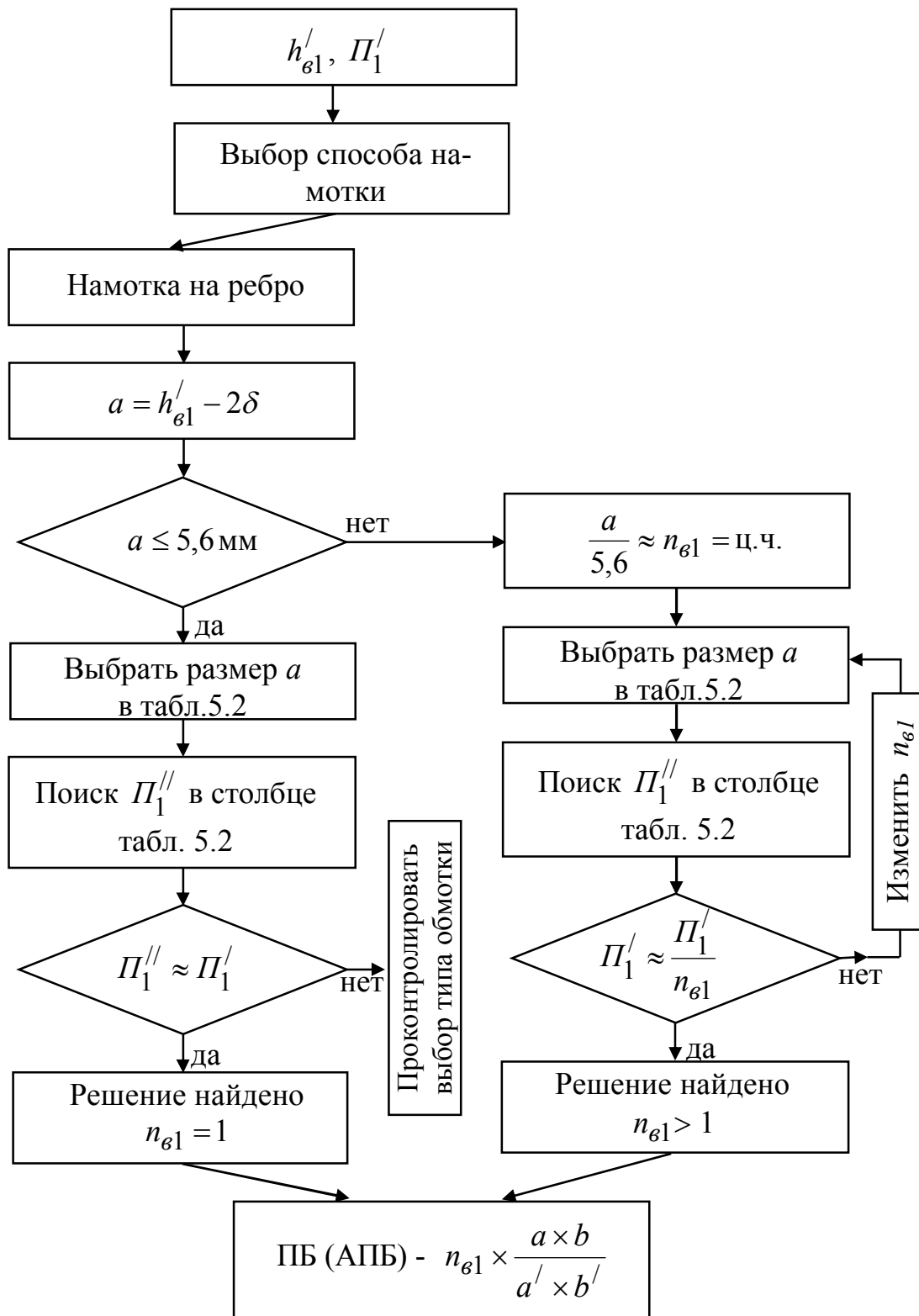


Рис.4. Блок-схема выбора размеров прямоугольного провода при намотке на ребро одно- двухслойной цилиндрической обмотки

Подобным образом могут рассматриваться все шесть возможных вариантов решений при намотке плашмя. Сказанное выше вовсе не означает, что поиск решения должен обязательно осуществляться именно в изображенной на рисунке последовательности. Величины ориентировочных значений $h'_{\text{с1}}$ и Π'_1 сразу нацеливают на более целесообразный вариант решения, что делает поиск более быстрым.

При намотке провода на ребро поиск решения начинается не со строки с подходящим размером b , а со столбца с подходящим размером a . Это является единственным отличием при выборе размеров прямоугольного провода при намотке на ребро.

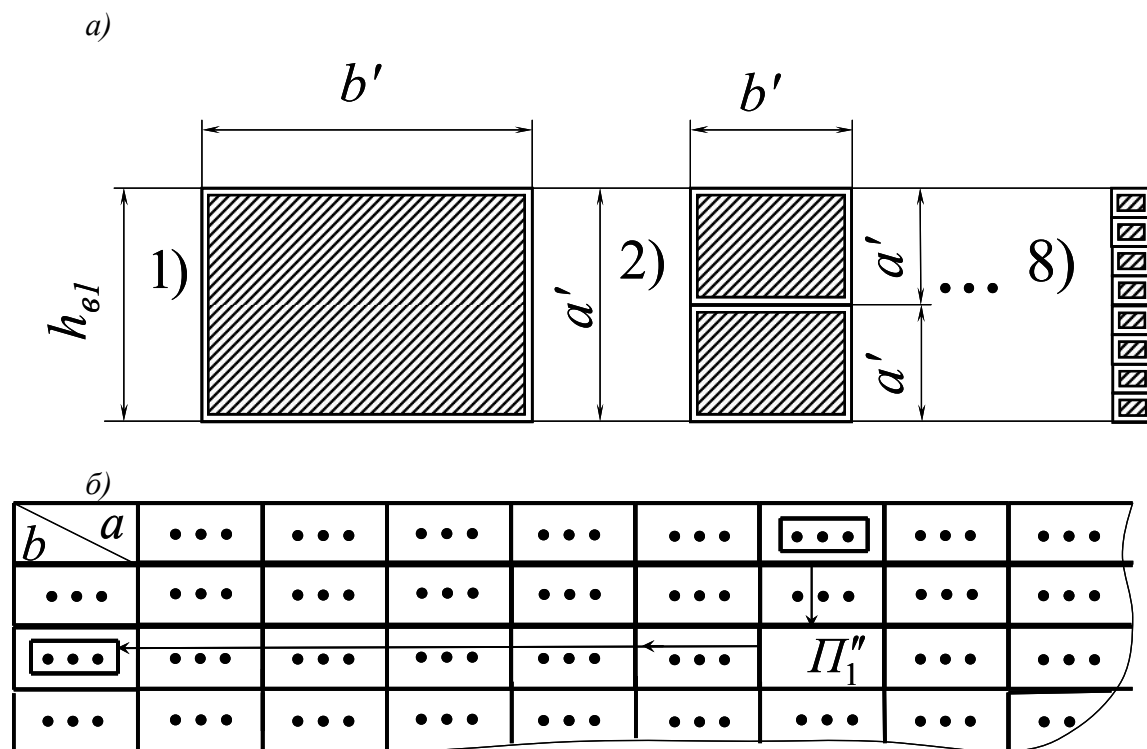


Рис. 5. Выбор размеров прямоугольного провода при намотке на ребро:
а - варианты решений; б - схема пользования таблицей

Учитывая, что задача выбора провода является традиционно трудной, приведем пример выбора провода марки ПБ. Получены ориентировочные значения осевого размера витка $h'_{\text{с1}} = 20$, мм и сечения витка $\Pi'_1 = 81,6$, мм². Так как, в соответствии с примечанием к табл.5.2, мак-

симальное значение большего размера неизолированного провода составляет $b = 16$, мм, то целесообразно рассмотреть сразу второй вариант решений намотки провода плашмя.

Для этого варианта решения больший размер изолированного элементарного провода должен быть максимально близким к половине $h'_{\epsilon 1}$, т.е. 10 мм, а сечение его должно быть максимально близким к половине Π'_1 , т.е. 40,8, мм².

Ближайшее табличное значение большего размера неизолированного элементарного провода должно быть близким $b \approx b' - 2\delta = 10 - 0,50 = 9,50$, мм. В столбце больших размеров прямоугольного провода табл.5.2 имеется значение $b = 9,5$, мм. В строке, соответствующей $b = 9,5$, мм, отыскиваем сечение провода близкое 40,8, мм². Наилучшим образом подходит сечение равное 41,9, мм², которое соответствует меньшему размеру неизолированного провода $a=4,5$, мм. Таким образом, решение выбора размеров провода найдено.

Уточненный осевой размер витка составляет $h_{\epsilon 1} = 2b' = 2 \cdot 10 = 20$, мм, уточненное сечение витка $\Pi_1 = 2\Pi_1'' = 2 \cdot 41,9 = 83,8$, мм². Подобранные размеры провода, мм, записываются так:

$$ПБ2 \times \frac{4,5 \times 9,5}{5,0 \times 10,0}$$

После выбора провода уточняется плотность тока в обмотке, если уточненное сечение отличается от ориентировочного. А также уточняется осевой размер обмотки, при расчете которого используется уточненный осевой размер витка и учитывается увеличение осевого размера на 5-15 мм вследствие неплотности намотки провода и возможных отклонений действительной толщины витковой изоляции от расчетной.

Радиальный размер обмотки зависит от того плашмя или на ребро наматывается провод, от количества слоев обмотки и от того, что имеется между слоями обмотки (a_{11}): масляный канал или жесткая между-слойная изоляция - два слоя электроизоляционного картона по 0,5 мм, при фазном напряжении обмотки не более 1 кВ. Ширина канала должна быть не менее, чем указано в табл. 9.2а, с.426.

При намотке плашмя для однослойной и двухслойной обмоток из прямоугольного провода радиальный размер обмотки равен, соответственно,

$$a_1 = a', \quad a_1 = 2a' + a_{11}.$$

При намотке на ребро:

$$a_1 = b', \quad a_1 = 2b' + a_{11}.$$

Традиционное затруднение при расчете двухслойных обмоток состоит в принятии решения, нужен ли масляный канал между слоями или же можно применить жесткую междуслойную изоляцию. В качестве критерия правильности решения можно принять плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности обмотки, которая в обмотках этого типа обычно не превышает 800-1000 Вт/м² при медном проводе и 600-800 Вт/м² при алюминиевом. Снижение допустимых плотностей теплового потока до такого уровня позволяет существенно замедлить старение масла и удлинить сроки его замены.

Если каждый провод обмотки омывается маслом с двух сторон, то плотность теплового потока для обмотки такой конструкции может быть рассчитана без определения поверхности охлаждения, по (7.17) или (7.17a). Эти формулы соответствуют намотке на ребро, а для намотки плашмя вместо двух сомножителей $b \times \frac{a}{a'}$ подставляется $a \times \frac{b}{b'}$. Плот-

ность теплового потока, попадающая в выше названные интервалы, подтверждает обоснованность конструкции. Если получено значение плотности теплового потока примерно в два раза меньшая, то целесообразно принять решение о замене масляного канала между слоями на жесткую изоляцию. Это приведет к необходимости дополнить формулы (7.17) и (7.17a) множителем 2, позволит обосновать более разумную конструкцию.

Если каждый провод обмотки не омывается маслом с двух сторон, то плотность теплового потока рассчитывается по (6.16) с определением поверхности охлаждения по (6.48), где индекс "2", соответствующий обмотке ВН, заменяется на "1". Для однослойной или двухслойной катушки, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр, в формуле (6.48) $n = 1$; $D_1' = 0$; $K = 1$. Для двухслойной катушки, намотанной непосредственно на цилиндр и с масляным каналом между слоями, $n = 1,5$; $K = 0,83$. Обеспечивая необходимую плотность теплового потока, обосновываем, какому варианту конструкции отдать предпочтение.

3. 2. Расчет винтовой обмотки

С учетом наибольшей применяемости все внимание уделяем только одноходовой и двухходовой обмоткам. Чтобы обосновать число ходов

обмотки нужно рассчитать ориентировочный осевой размер витка h'_{e1} по (6.17), учитывая, что осевой размер горизонтального масляного охлаждающего канала h_{K1} должен быть не менее 4 мм.

Если $h'_{e1} \leq 0,0165$ м для медного провода и $h'_{e1} \leq 0,0185$ м для алюминиевого, то следует применять одноходовую винтовую обмотку. Это обусловлено максимальным размером обмоточного провода в изоляции.

Если по (6.17) получен ориентировочный осевой размер витка, превышающий выше названные 0,0165 и 0,0185 м, но не более $0,035 \div 0,045$ м, то следует применять двухходовую винтовую обмотку. В этом случае необходимо определить ориентировочный осевой размер витка по (6.18). Ориентировочное сечение витка находится, как и для всех обмоток НН, по (6.6).

Далее проверяется ориентировочный осевой размер витка по допустимой плотности теплового потока на поверхности обмотки по (5.6) или (5.7) или по рис. 5.34.

Если ориентировочный осевой размер витка составляет не более половины значения b , найденного по одной из названных формул или по рисунку, то можно уменьшить поверхность охлаждения обмотки. Для этого в одноходовой обмотке делаются радиальные каналы через два витка, а в двухходовой обмотке масляный канал между двумя группами проводов заменяется изоляционной прокладкой толщиной 20,5 мм, если $h'_{e1} - h_{K1} \leq b$.

Проведенные уточнения конструкции обмотки позволяют по ориентировочным значениям сечения витка и осевого размера витка подобрать подходящий провод по табл. 5.2 с соблюдением пяти условий, с.271.

После этого остается, как обычно, уточнить сечение витка, плотность тока, осевой и радиальный размеры обмотки и диаметры.

В завершении расчета следует найти плотность теплового потока на поверхности обмотки по (7.19) - (7.19в), в зависимости от того имеются радиальные каналы между всеми витками или только между сдвоенными.

3. 3. Расчет цилиндрической многослойной обмотки из алюминиевой ленты

Пояснения излагаются с использованием примера расчета подобной обмотки, приведенного на с.298.

Алюминиевая лента выбирается по ГОСТ 13726-78, в результате возможна незначительная коррекция осевого размера обмотки. Стандартная толщина ленты и осевой размер обмотки определяют уточненное сечение витка и уточненную плотность тока.

Общий суммарный допустимый радиальный размер алюминиевой ленты по (5.7), поделенный на толщину ленты, позволяет получить предельное число витков в катушке при предельной допустимой плотности теплового потока на ее поверхности. Сравните это предельное число витков в катушке с числом витков на одну фазу рассчитываемой обмотки НН. Если число витков фазы обмотки НН не превышает предельного числа витков в катушке, то фаза обмотки НН может быть выполнена одной катушкой. Принимая решение, помните, что не нужно стремиться получить плотность теплового потока близкой к предельно допустимой, особенно это относится к тем типам обмоток, у которых имеются только горизонтальные масляные каналы.

Если число витков фазы обмотки НН превышает предельное число витков в катушке, то фаза обмотки НН выполняется в виде двух концентрических катушек с одинаковым числом витков. Эти катушки разделены осевым охлаждающим масляным каналом. Ширина канала должна быть не менее, чем указано в табл. 9.2а, с. 426.

Размеры изоляционного цилиндра между обмоткой НН и магнитопроводом определяются по иллюстрации главной изоляции обмоток НН и ВН раздела "Расчет основных размеров трансформатора".

Плотность теплового потока на поверхности обмотки определяется по (7. 17а), где значения коэффициентов K_3 , K_d и a/a' принимаются такими, как в примере расчета. Вместо параметра b подставляется произведение числа витков в катушке на толщину алюминиевой ленты. Сделайте вывод по обеспеченной плотности теплового потока на поверхности обмотки.

3. 4. Расчет цилиндрической многослойной обмотки из круглого провода

Эта обмотка применяется в качестве обмотки ВН при напряжениях от 3 до 35 кВ и обмотки НН при напряжениях от 3 до 10 кВ.

Уделим особое внимание расчету, принимая во внимание главное применение ее в качестве обмотки ВН. Расчеты числа витков для получения номинального напряжения, для напряжений всех ответвлений чаще всего не вызывают затруднений.

Ориентировочная плотность тока в обмотке ВН определяется по (6.33) для получения ориентировочного сечения. Плотность тока должна быть как можно ближе к плотности тока, обеспеченной в обмотке НН. Это нужно помнить при выборе круглого провода, подбирая наиболее подходящее сечение по табл. 5.1, с.211. Обязательно должны уточняться сечение витка и плотность тока.

Рассчитывая число витков в слое, используется диаметр изолированного провода, полученный с учетом примечаний 1 и 2 табл. 5.1.

Осовой размер l_2 обмотки ВН принимается равным уточненному осевому размеру l_1 обмотки НН, если были приняты одинаковые изоляционные расстояния обмоток НН и ВН от ярма $l_{01} = l_{02}$. В другом случае принимается $l_2 = l_1 - 2(l_{02} - l_{01})$. Число слоев в обмотке определяется по (6.39) и округляется до ближайшего большего целого, где w_2 - число витков на верхней ступени регулирования.

В дальнейшем нужно обосновать конструкцию обмотки с учетом того, что возможны варианты а, б, г, д по рис. 5.22, с.237. Предпочтение нужно отдать варианту, для которого будет получена плотность теплового потока 800-1000 Вт/м² и наименьший радиальный размер обмотки. Поверхность охлаждения определяется по (6.48).

3. 5. Расчет непрерывной катушечной обмотки из прямоугольного провода

В механическом отношении эта обмотка является одной из самых прочных из применяемых в трансформаторах. Она может применяться в очень большом диапазоне мощностей S_H : от 160 кВА до 1000 МВА. Диапазон применения ее по напряжению составляет от 2-3 до 500 кВ и более.

Ориентировочное сечение витка определяется по (6.34), используя предварительное значение плотности тока в обмотке, полученное по (6.33).

Так как используется провод прямоугольного сечения и наматывается плашмя, то больший размер провода b не должен превосходить предельный размер, найденный по предельно допустимому значению плотности теплового потока на охлаждаемой поверхности (обычно не более 1200-1400 Вт/м²) по (5.6) или (5.7).

По ориентировочному сечению витка и максимально возможному размеру провода b , используя табл. 5.2, выбирают подходящее сечение прямоугольного провода так, чтобы при наименьшем числе элементар-

ных проводов, обеспечить требуемое сечение витка. Обязательно соблюдайте при выборе провода пять требований, указанных на с.289 и 290 [1]. В этой обмотке высота катушки равна большему размеру провода в изоляции.

В обмотках классов напряжения 20 кВ и более входные катушки каждой фазы с двух ее сторон выполняются с усиленной изоляцией, предотвращающей разряд между витками при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений.

Расчет усиленной изоляции входных витков и катушек производится согласно указаниям § 4.5 и табл. 4.10.

Рекомендуется, чтобы радиальные размеры катушек, отличающиеся числом витков и толщиной витковой изоляции, были приблизительно равными, а имеющееся отличие не составляло более чем двойная толщина провода. Допускается выравнивание радиального размера отдельных катушек путем вматывания между их витками полосок электроизоляционного картона.

Если больший размер выбранного провода b составляет не более половины, полученного по (5.6) или (5.7), то можно радиальные каналы сделать через две катушки. В двойных катушках эти каналы заменяются изоляционными шайбами, сохраняются каналы между двойными катушками.

В завершении расчета обмотки определяются внутренний и наружный диаметры по (6.58), (6.59), а также плотность теплового потока на поверхности обмотки по (7.19) - (7.19в).

3. 6. Расчет цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного провода

Эта обмотка может применяться в основном в качестве обмотки ВН в трансформаторах с масляным охлаждением классов напряжения от 10 до 35кВ мощностью от 630 кВА и более.

Основная трудность при проектировании этого типа обмотки как в качестве обмотки ВН, так и НН заключается в выборе размеров провода.

Разрешать ее следует таким образом. Выбор провода начинается после получения ориентировочных значений осевого размера обмотки l_2 , сечения витка Π_2^l , плотности тока J_2 . Провод обмотки, который может состоять из одного или нескольких параллельных проводов, должен обеспечить плотность теплового потока на охлаждаемой поверхно-

сти обмотки не более $q=1200-1400 \text{ Вт/м}^2$ и принятый уровень добавочных потерь (от 5 до 20%).

Плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности контролируется сравнением общего суммарного радиального размера проводов обмотки, необходимого для получения полного сечения всех витков обмотки по (6.49), с предельным размером по (5.6) или (5.7). В результате принимается решение, следует ли делить обмотку на две или три концентрические катушки, чтобы у каждой из них суммарный радиальный размер проводов не превышал предельно допустимого.

Затем выбирается радиальный размер металла провода a , т.к. провод наматывается плашмя, и число слоев обмотки $n_{СЛ2}$ по табл. 5.9, с.264, с учетом принятого уровня добавочных потерь. Число слоев обмотки легко изменяется путем варьирования соотношения размеров поперечного сечения провода при заданной его площади по табл. 5.2, с. 212.

Остальное при расчете обмотки не вызывает трудностей и в достаточной мере пояснено применительно к другим типам обмоток.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

[1, гл. 7]

4. 1. Определение потерь короткого замыкания

Основные потери в обмотках определяются по (7.3) или (7.4), где масса металла провода может быть получена по (7.6) или (7.7). Общая масса металла обмотки ВН определяется для числа витков на верхней ступени регулирования, но при определении основных потерь в обмотке ВН, как одной из составляющих потерь короткого замыкания, используется масса металла обмотки ВН для числа витков на средней, номинальной, ступени регулирования.

Если при проектировании обмоток НН и ВН обеспеченная полусумма уточненных значений плотностей токов превышает более, чем на 5-10% значение средней плотности тока, получаемой по (7.10) или (7.10а), то расчетные потери короткого замыкания будут недопустимо отличаться от заданных. Обмотка ВН, как наружная, всегда по объему и массе больше обмотки НН, поэтому при выше названном соотношении уточненных плотностей токов в этих обмотках, расчетные потери короткого замыкания будут отличаться от заданных в большую сторону.

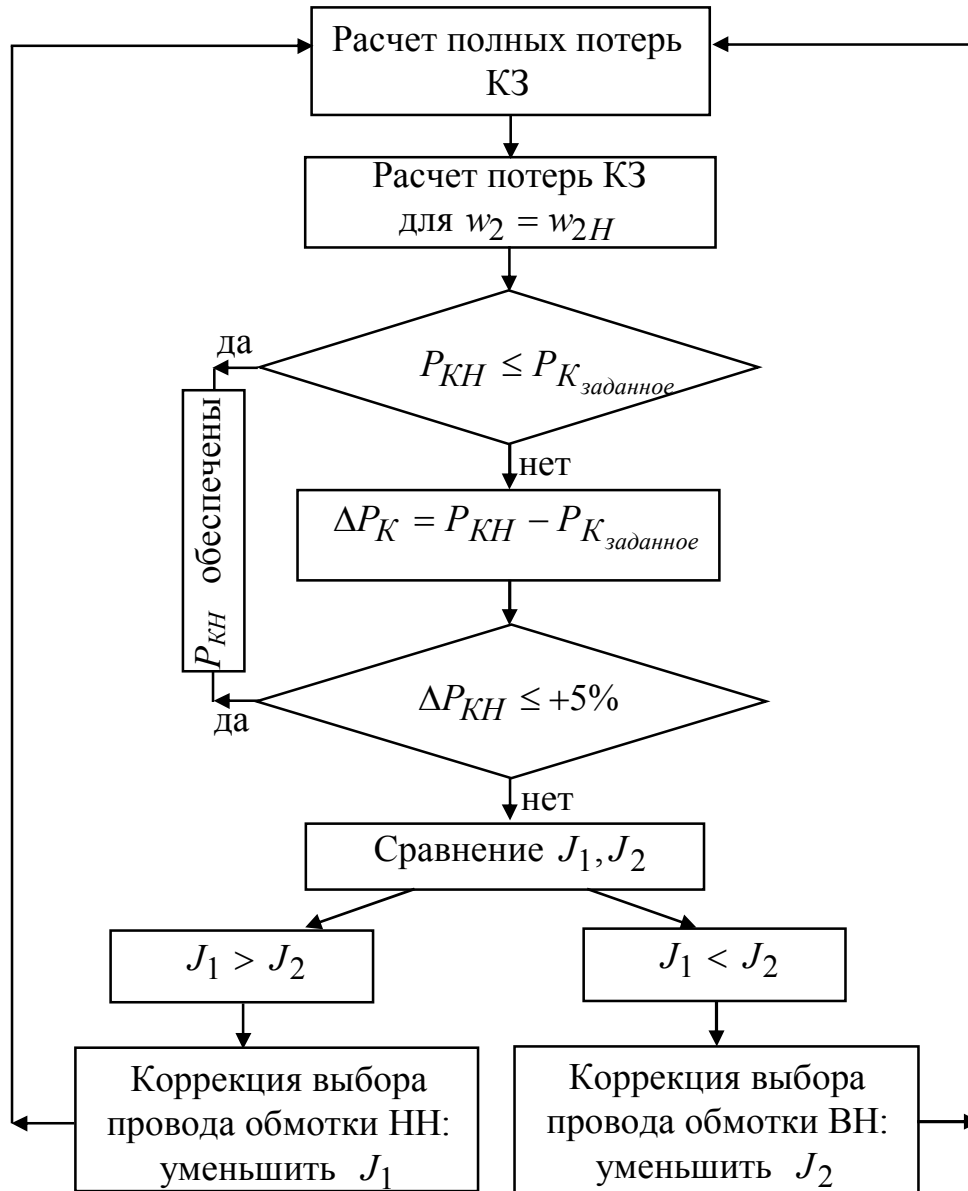


Рис.6. Блок-схема обеспечения потерь короткого замыкания

Определение добавочных потерь в обмотках сводится к расчету коэффициента добавочных потерь, величина которого больше единицы. Этот коэффициент получается по (7.14), (7.14а), (7.15), (7.15а) в зависимости от материала и формы сечения провода. В этих формулах значение β (не путайте его с ранее определяемым коэффициентом экономичности) рассчитывается по (7.13) в случае намотки плашмя и по (7.13а) для обмотки из круглого провода. Если прямоугольный провод наматывается на ребро, то в (7.13) вместо большего размера провода, подставляется меньший.

В формулах (7.13), (7.13а) часто имеется затруднение при определении m - числа проводников обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции продольного поля рассеяния. Посмотрите внимательно на рис. 7.2, с.309. Слева изображена многослойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода, намотанного плашмя, справа многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода. Для этих двух обмоток m - количество элементарных проводников в одном слое, образованном по высоте обмотки. Рисунок поясняет расчет коэффициентов добавочных потерь от продольного поля рассеяния с осевым по отношению к обмоткам направлением индукционных линий, где n – число элементарных проводников обмотки по толщине обмоток равное числу слоев для этих двух обмоток.

Если расчетное значение потерь короткого замыкания превышает более чем на +5% заданное значение, то проведите анализ создавшейся ситуации. Проверьте правильность расчетов, правильность использования формул, соотношение между уточненными плотностями токов в обмотках НН и ВН. Снижение потерь короткого замыкания, при отсутствии ошибок в расчетах и в применении формул, делается снижением плотности тока в той обмотке, где плотность выше или снижением плотности в обмотке ВН, если соотношение плотностей тока соответствует требованиям, о которых говорилось в начале данного подраздела. Для этого необходимо обеспечить небольшое увеличение действительного сечения витка, скорректировав выбор провода.

4. 2. Определение напряжения короткого замыкания

Отклонение расчетного значения напряжения короткого замыкания от заданного разрешается не более $\pm 5\%$. Устранение чрезмерного отклонения напряжения короткого замыкания может быть достигнуто за счет изменения реактивной составляющей. Активная составляющая определяется величиной потерь короткого замыкания, обеспеченных в предыдущем расчете.

При расчете реактивной составляющей следует пользоваться уточненными (реальными) размерами обмоток, уточненными значениями приведенного канала рассеяния и коэффициента экономичности.

Небольшое уменьшение реактивной составляющей может быть получено за счет увеличения до 10-15% осевого размера обмоток при уменьшении их радиальных размеров. При этом корректируются расчеты, начиная с проектирования обмотки НН.

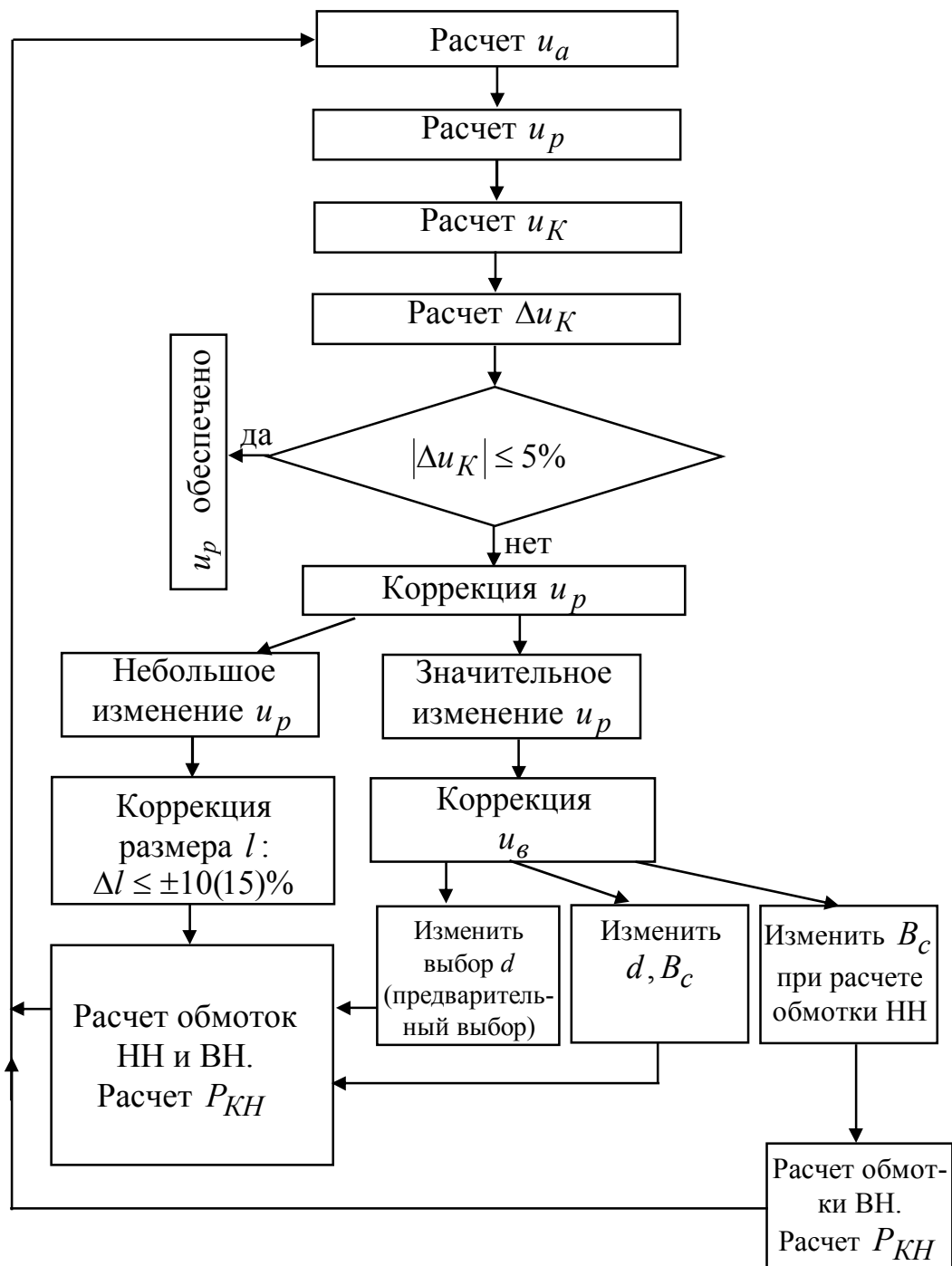


Рис.7. Блок-схема обеспечения напряжения короткого замыкания

Небольшое увеличение реактивной составляющей может быть получено за счет уменьшения до 10-15% осевого размера обмоток при увеличении их радиальных размеров.

Существенное изменение реактивной составляющей достигается изменением напряжения одного витка за счет изменения диаметра стержня магнитной системы при предварительном выборе основных

размеров или (и) индукции в нем при расчете обмотки НН, округляя число ее витков.

Самое существенное изменение реактивной составляющей возможно применением всех выше названных воздействий одновременно.

5. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА [1, гл. 8]

5. 1. Определение размеров магнитной системы и массы стали

Размеры пакетов выбираются по табл. 8.2-8.5 в зависимости от диаметра стержня, там же указаны число ступеней в стержне и ярме.

Общая толщина пакетов стержня (ширина ярма) определяется как удвоенная сумма толщин пакетов.

Площадь ступенчатой фигуры стержня $П_c$ и ярма $П_я$ возьмите из табл.8.6 или 8.7, здесь же приведено значение объема угла магнитной системы.

При расчете активного сечения стержня, ярма, а также объема электротехнической стали угла магнитной системы используйте значение коэффициента заполнения электротехнической сталью по табл. 2.2 и ее примечаниям, с.77.

Длина стержня магнитной системы рассчитывается суммированием осевого размера каждой обмотки с изоляционными расстояниями от их торцов до ярм. Сравнивая длины стержня, получаемые таким образом, выбираем наибольшую из двух, в случае их различия.

5.2. Определение потерь холостого хода

Потери холостого хода в плоской трехфазной магнитной стержневой конструкции рассчитываются по (8.32), определяя удельные потери в электротехнической стали и в зоне шихтованного стыка по табл. 8.9 или 8.10. Расчетное значение потерь холостого хода может отличаться от заданного не более чем на +7, 5%.

Если в процессе окончательного расчета магнитной системы не обеспечены потери холостого хода, то в первую очередь проверьте правильность расчета потерь. Сравните массу магнитной системы со значением, полученным в предварительном расчете, при выборе основных размеров трансформатора. Проверьте, находится ли индукция в стержне

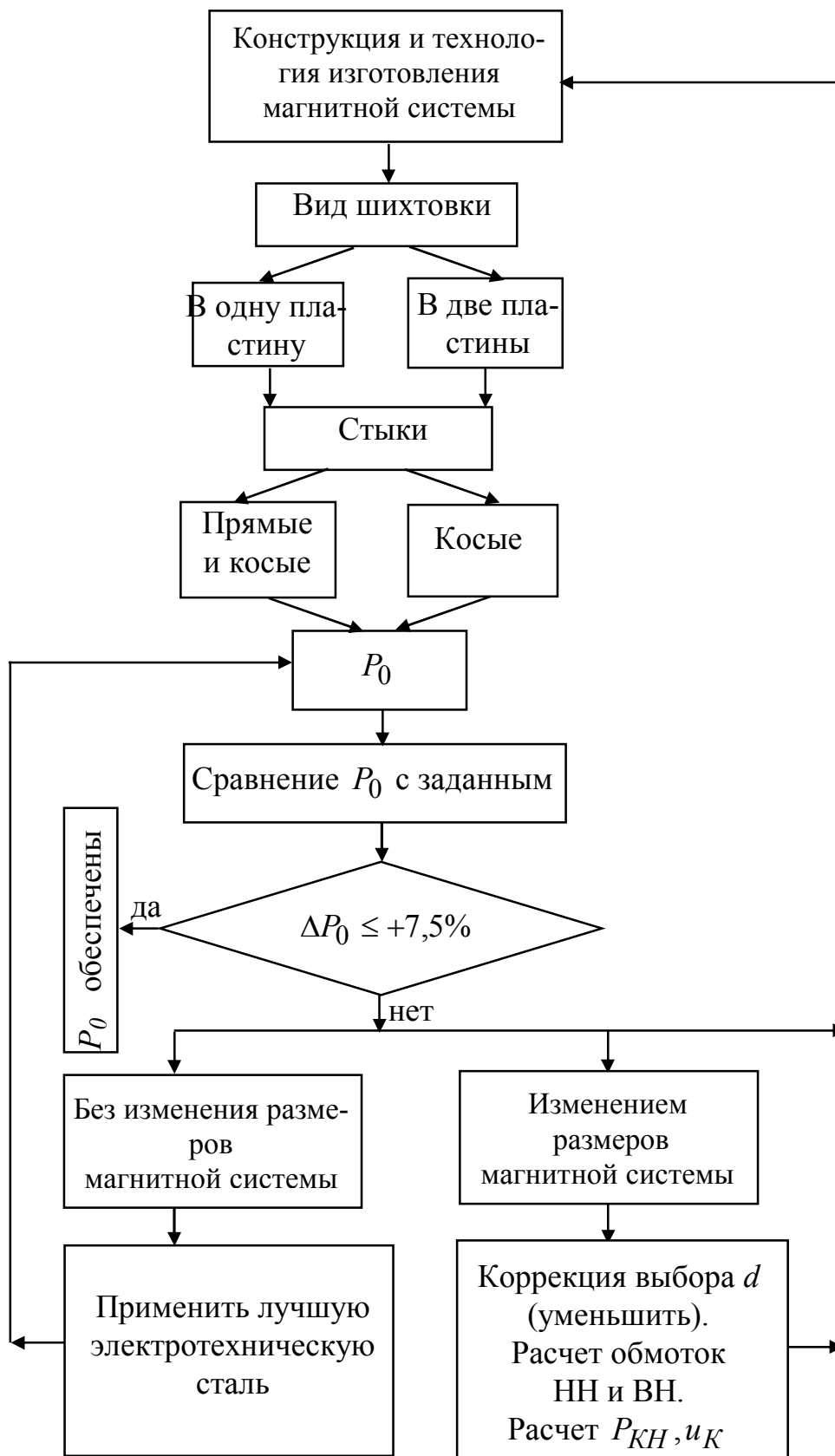


Рис.8. Блок-схема обеспечения потерь холостого хода

магнитной системы в рекомендуемых пределах. Проанализируйте сложившуюся ситуацию. Если ошибок в расчете нет и индукция стержня находится в рекомендуемом пределе, то могут быть применены следующие меры (если они не реализованы в полной мере): запланировать шихтовку в один лист, применить лучшую электротехническую сталь (только из отечественных), увеличить количество косых стыков.

5.3. Определение тока холостого хода

Ток холостого хода выше названной магнитной системы рассчитывается по (8.43) и (8.48а). Расчетное значение тока холостого хода может отличаться от заданного не более чем на +15%. Если в процессе окончательного расчета магнитной системы он не обеспечен, то пути выхода из этой ситуации те же, что и при обеспечении потерь холостого хода.

6. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРА

6.1. Внешние характеристики

Рассчитать зависимости $U_{HH} = f(k_{нз})$ при питании обмотки ВН понижающего трансформатора номинальным напряжением номинальной частоты при изменении величины симметричной нагрузки до 1,25 номинальной и неизменном значении $\cos \varphi_2$, при активно-индуктивной нагрузке $\cos \varphi_2 = 0,7$, при активно-емкостной нагрузке $\cos(-\varphi_2) = 0,8$.

При изменении коэффициента нагрузки трансформатора в диапазоне значений $k_{нз} = 0 \div 1,25$ рассчитать для обоих характеров нагрузки изменение напряжения трансформатора

$$\Delta U \approx k_{нз} (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2), \%$$

где u_a, u_p – расчетные значения активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания, %;

$$\text{при } \cos \varphi_2 = 0,7 \quad \sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,7^2} = 0,714, \text{ о.е.};$$

$$\text{при } \cos(-\varphi_2) = 0,8 \quad \sin(-\varphi_2) = -\sqrt{1 - \cos^2(-\varphi_2)} = -\sqrt{1 - 0,8^2} = -0,6, \text{ о.е.};$$

Фазное (линейное) напряжение обмотки НН

$$U_{HH} = 100 - \Delta U, \%$$

Результаты расчетов внешних характеристик при изменении коэффициента нагрузки в диапазоне значения $k_{н2} = 0 \div 1,25$ для обоих характеров нагрузки привести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты расчетов внешних характеристик трансформатора

Коэффициент нагрузки $k_{н2}$, о.е.		0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
Активно-индуктивная $\cos \varphi_2 = 0,7$	$\Delta U, \%$	0					
	$U_{HH}, \%$	100					
Активно-емкостная $\cos(-\varphi_2) = 0,8$	$\Delta U, \%$	0					
	$U_{HH}, \%$	100					

По результатам расчетов построить внешние характеристики трансформатора в одних осях координат и сделать выводы:

- от чего зависит изменение вторичного напряжения ΔU ;
- как сказываются положительное и отрицательное значения ΔU при увеличении коэффициента нагрузки трансформатора на его вторичном напряжении;
- какому характеру нагрузки и при каком коэффициенте нагрузки соответствует наибольшее изменение вторичного напряжения трансформатора.

6.2. Зависимости $\Delta U = f(\varphi_2)$

Зависимости отклонения напряжения на клеммах вторичной обмотки трансформатора от характера симметричной нагрузки $\Delta U = f(\varphi_2)$, рассчитать для двух неизменных величин коэффициента нагрузки ($k_{н2} = 0,5; 1,0$) при питании со стороны обмотки ВН номинальным напряжением номинальной частоты.

Результаты расчетов привести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты расчетов зависимостей $\Delta U = f(\varphi_2)$

$\Delta U = f(\varphi_2)$							
φ_2 , град	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
$k_{нз}=0,5$							
$k_{нз}=1,0$							

Окончание табл. 6.2

$\Delta U = f(\varphi_2)$						
φ_2 , град	90	75	60	45	30	15
$k_{нз}=0,5$						
$k_{нз}=1,0$						

По результатам расчетов построить зависимости $\Delta U = f(\varphi_2)$ в одних осях координат и сделать выводы:

- как сказывается характер нагрузки на отклонении напряжения ΔU ;
- как сказывается отклонение напряжения ΔU на напряжении вторичной обмотки трансформатора;
- при каком характере нагрузки отклонение напряжения максимальное.

6.3. Зависимости $\eta=f(k_{нз})$

Рассчитать зависимости коэффициента полезного действия от величины симметричной нагрузки при питании трансформатора со стороны обмотки ВН номинальным напряжением номинальной частоты, при заданных коэффициентах мощности активно-индуктивного $\cos \varphi_2 = 0,7$ и активно-емкостного $\cos(-\varphi_2) = 0,8$ характеров нагрузки.

Трансформатор работает с максимальным коэффициентом полезного действия при коэффициенте нагрузки

$$k_{нз}(\eta_{\max}) = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}.$$

Коэффициент полезного действия определить по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + k_{нз}^2 P_K}{k_{нз} S_H \cos \varphi_2 + P_0 + k_{нз}^2 P_K},$$

где P_0 – расчетное значение потерь холостого хода, кВт;

P_K – расчетное значение потерь короткого замыкания, кВт.

Результаты расчетов привести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты расчетов зависимостей $\eta = f(k_{н2})$

Коэффициент нагрузки	$k_{н2}$	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	$k_{н2}(\eta_{\max})$
Активно-индуктивная нагрузка $\cos \varphi_2 = 0,7$	P_0 , кВт							
	$k_{н2}^2 \cdot P_K$							
	$k_{н2} S_H \cos \varphi_2$							
	η , о.е.							
Активно-емкостная нагрузка $\cos(-\varphi_2) = 0,8$	P_0 , кВт							
	$k_{н2}^2 \cdot P_K$							
	$k_{н2} S_H \cos \varphi_2$							
	η , о.е.							

По результатам расчетов построить зависимости $\eta = f(k_{н2})$ в одних осях координат и сделать выводы:

- от чего зависит коэффициент полезного действия трансформатора;
- от чего зависит коэффициент нагрузки, при котором коэффициент полезного действия равен максимальной величине;
- от чего зависит максимальное значение коэффициента полезного действия трансформатора.

6.4. Параллельная работа двух трансформаторов одинаковой мощности при разных коэффициентах трансформации

Оценить нагруженность уравнительным током двух трансформаторов одинаковой мощности при параллельной работе при неизменном характере нагрузки ($\cos \varphi_2 = 0,7$) для двух случаев: когда один из трансформаторов включен на ответвление обмотки ВН, соответствующее номинальному числу витков, а другой - поочередно на два из остальных четырех ответвлений: +2,5% и +5%.

Т.е. коэффициент трансформации второго трансформатора будет больше чем у первого на +2,5% и +5%.

Коэффициент трансформации первого трансформатора равен отношению числа витков фазы обмотки ВН к числу витков фазы обмотки

$$H H \quad k_1 = \frac{w_2}{w_1}.$$

Тогда, если $k_1 = k$, то $k_2 = 1,025k$ и $1,05k$.

Рассчитаем параметры схемы замещения короткого замыкания:

- полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{u_K U_{\phi BH}}{100 I_{BH}}, \text{ Ом,}$$

где u_K – расчетное значение напряжения короткого замыкания, %;
 $U_{\phi BH}$ – фазное напряжение обмотки ВН, В; I_{BH} – номинальное значение фазного тока обмотки ВН, А;

- активное сопротивление короткого замыкания

$$r_K = \frac{P_K}{3 I_{BH}^2}, \text{ Ом,}$$

где P_K – расчетное значение потерь короткого замыкания, Вт;

- индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}, \text{ Ом.}$$

Фазовый угол уравнильного тока относительно ΔU

$$\varphi_K = \arctg \frac{x_{K1} + x_{K2}}{r_{K1} + r_{K2}} = \arctg \frac{x_K}{r_K}, \text{ град.}$$

Угол нагрузки $\varphi_2 = \arccos 0,7 = \arccos 0,7 = 45,57$, град.

При параллельной работе двух трансформаторов одинаковой мощности, когда второй трансформатор включен на ответвление +2,5%, уравнильный ток равен

$$I_y = \frac{U_{\phi BH} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{1,025k} \right)}{2Z_K} = \frac{0,025 U_{\phi BH}}{2,05kZ_K}, \text{ А.}$$

При параллельной работе двух трансформаторов одинаковой мощности, когда второй трансформатор включен на ответвление +5,0%, уравнильный ток равен

$$I_y = \frac{0,05 U_{\phi BH}}{2,1kZ_K}, \text{ А.}$$

Уравнильный ток дополнительно нагружает трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации

$$I_{\max 2,5\%} = \sqrt{I_{BH}^2 + I_y^2 + 2 I_{BH} I_y \cos(\varphi_K - \varphi_2)}, \text{ А,}$$

$$I_{\max 5\%} = \sqrt{I_{BH}^2 + I_y^2 + 2I_{BH}I_y \cos(\varphi_K - \varphi_2)}, \text{ A},$$

а трансформатор с большим коэффициентом трансформации уравнительный ток разгружает

$$I_{\min 2,5\%} = \sqrt{I_{BH}^2 + I_y^2 - 2I_{BH}I_y \cos(\varphi_K - \varphi_2)}, \text{ A},$$

$$I_{\min 5\%} = \sqrt{I_{BH}^2 + I_y^2 - 2I_{BH}I_y \cos(\varphi_K - \varphi_2)}, \text{ A}.$$

Определить нагруженность трансформаторов при наличии уравнительного тока по следующим выражениям:

$$\frac{I_{\max 2,5\%}}{I_{BH}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{BH}}\right)^2 + 2\frac{I_y}{I_{BH}} \cos(\varphi_K - \varphi_2)}, \text{ о.е.},$$

$$\frac{I_{\max 5\%}}{I_{BH}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{BH}}\right)^2 + 2\frac{I_y}{I_{BH}} \cos(\varphi_K - \varphi_2)}, \text{ о.е.},$$

$$\frac{I_{\min 2,5\%}}{I_{BH}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{BH}}\right)^2 - 2\frac{I_y}{I_{BH}} \cos(\varphi_K - \varphi_2)}, \text{ о.е.},$$

$$\frac{I_{\min 5\%}}{I_{BH}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{BH}}\right)^2 - 2\frac{I_y}{I_{BH}} \cos(\varphi_K - \varphi_2)}, \text{ о.е.}$$

После расчета нагруженностей сделайте выводы:

- как нужно уменьшить нагрузку трансформаторов при двух вариантах различий их коэффициентов трансформации, чтобы у первого трансформатора, как наиболее нагруженного, уменьшить нагрузку до номинальной и обеспечить ему возможность работать в продолжительном режиме работы.

6.5. Параллельная работа двух трансформаторов разных мощностей

Рассчитать допустимую нагрузку трансформатора при параллельной работе с другим трансформатором предельно допустимой большей (или меньшей) мощности при заданном характере нагрузки ($\cos \varphi_2 = 0,7$).

ГОСТом допускается включать на параллельную работу трансформаторы, отличающиеся номинальной мощностью не более чем в 3 раза. Номинальные мощности и напряжения короткого замыкания трансформаторов, работающих параллельно

$$S_{H1}, \text{ кВА}, u_{K1}, \%, S_{H2}, \text{ кВА}, u_{K2}, \%,$$

где S_{H2}, u_{K2} – табличные значения номинальной мощности и напряжения короткого замыкания трансформатора предельно допустимой мощности.

Если $u_{K1} \neq u_{K2}$, то при повышении нагрузки трансформатор с наименьшим напряжением короткого замыкания первым достигнет номинальной мощности.

Нагрузка каждого из параллельно работающих трансформаторов

$$S_1 = \frac{\sum_{i=1} S_{Hi}}{\frac{u_{Ki}}{S_{Hi}} \sum_i \frac{S_{Hi}}{u_{Ki}}} = \frac{S_{H1} + S_{H2}}{\frac{u_{K1}}{S_{H1}} \left(\frac{S_{H1}}{u_{K1}} + \frac{S_{H2}}{u_{K2}} \right)}, \text{ кВА},$$

$$S_2 = \frac{\sum_{i=1} S_{Hi}}{\frac{u_{Ki}}{S_{Hi}} \sum_i \frac{S_{Hi}}{u_{Ki}}} = \frac{S_{H1} + S_{H2}}{\frac{u_{K2}}{S_{H2}} \left(\frac{S_{H1}}{u_{K1}} + \frac{S_{H2}}{u_{K2}} \right)}, \text{ кВА},$$

$$S_{1*} = \frac{S_i}{S_{Hi}} = \frac{\sum_i S_{Hi}}{u_{Ki} \sum_i \frac{S_{Hi}}{u_{Ki}}}, \text{ о.е.}, \quad S_{2*} = \frac{S_i}{S_{Hi}} = \frac{\sum_i S_{Hi}}{u_{Ki} \sum_i \frac{S_{Hi}}{u_{Ki}}}, \text{ о.е.}$$

После расчетов сделайте выводы:

- на какую величину необходимо уменьшить суммарную нагрузку трансформаторов для исключения перегрузки у самого нагруженного и обеспечения его работы при номинальной нагрузке в продолжительном режиме работы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Определение основных электрических величин

7.1.1. Изобразите электрические схемы соединения трехфазных обмоток (треугольник, звезда, зигзаг).

7.1.2. Укажите соотношения между фазными и линейными напряжениями (токами) в трехфазных обмотках.

7.1.3. Что характеризует группа соединения трехфазных обмоток трансформатора и от чего она зависит?

7.1.4. Какие группы соединения трехфазных обмоток трансформаторов применяются?

7.1.5. Что такое класс напряжения обмотки?

7.1.6. Что такое класс напряжения трансформатора?

7.1.7. Что такое испытательное напряжение обмотки и как оно выбирается?

7.1.8. Как можно определить активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания при расчете основных электрических величин?

7.2. Расчет основных размеров трансформатора

7.2.1. Перечислите основные размеры трансформатора.

7.2.2. Поясните конструкцию магнитной системы спроектированного трансформатора.

7.2.3. Как выбирается материал магнитной системы и значение индукции?

7.2.4. Поясните содержание таких понятий как коэффициент заполнения круга и коэффициент заполнения сталью.

7.2.5. Как выбирается тип обмоток?

7.2.6. Чем руководствовались при выборе материала обмоток?

7.2.7. Что характеризует коэффициент усиления ярма?

7.2.8. Назовите изоляционные расстояния, выбираемые по испытательным напряжениям.

7.2.9. Какой метод использовался при расчете основных размеров и как можно их рассчитать по-иному?

7.2.10. Что такое коэффициент экономичности и как он рассчитывается?

7.2.11. Как обоснован предварительное значение диаметра стержня?

7.3. Расчет обмоток НН и ВН

- 7.3.1. Как записывается результат выбора прямоугольного провода?
- 7.3.2. Как уточняется плотность тока обмотки НН (ВН)?
- 7.3.3. Как рассчитывается масса металла обмотки НН (ВН)?
- 7.3.4. Как обосновывается величина осевого масляного канала?
- 7.3.5. Как определяются размеры изоляционного цилиндра между обмоткой и магнитопроводом?
- 7.3.6. Как определяется уточненное сечение витка?
- 7.3.7. Как рассчитывается число витков обмотки ВН на номинальной ступени?
- 7.3.8. Как рассчитывается число витков обмотки ВН на одной ступени регулирования?
- 7.3.9. Сколько ступеней регулирования имеет обмотка ВН?
- 7.3.10. Как рассчитывается число витков обмотки ВН на верхней ступени регулирования?
- 7.3.11. Как регулируется напряжение на клеммах вторичной обмотки понижающего трансформатора при неизменном напряжении обмотки ВН?
- 7.3.12. Что такое ориентировочная плотность тока обмотки и как она определяется?
- 7.3.13. Что представляет собой электростатический экран обмотки ВН и когда он устанавливается?
- 7.3.14. Какой тип переключателя напряжений используется в обмотке ВН?
- 7.3.15. По каким параметрам выбирается переключатель напряжений обмотки ВН?
- 7.3.16. Какое число витков используется при расчете массы металла обмотки ВН?
- 7.3.17. Для чего необходимо отключать трансформатор от линий высокого и низкого напряжений перед тем, как изменять число витков обмотки ВН переключателем выбранного типа?
- 7.3.18. Зачем стремятся создать более компактную конструкцию обмоток?
- 7.3.19. Как обосновывается величина радиального масляного канала?
- 7.3.20. Назовите рекомендуемые расчетные значения плотности теплового потока для принятого типа обмотки НН (ВН).
- 7.3.21. Как рассчитывается осевой размер обмотки на начальном этапе расчета?

7.3.22. Как определяются размеры изоляционного цилиндра между обмотками НН и ВН одноименных фаз?

7.3.23. Что такое уточненная плотность тока обмотки и как она определяется?

7.3.24. Как выбирается толщина витковой изоляции провода?

7.3.25. Как зависит уровень добавочных потерь в обмотке от числа ее слоев?

Расчет двухслойных и однослойных цилиндрических обмоток из прямоугольного провода

7.3.26. От чего зависит число слоев обмотки?

7.3.27. Как определяется число витков на фазу обмотки НН?

7.3.28. Для трансформаторов какой мощности применяется данный тип обмотки?

7.3.29. Какие параметры используются при выборе размеров прямоугольного провода?

7.3.30. Как рассчитывается ориентировочный осевой размер витка?

7.3.31. Как рассчитывается ориентировочное сечение витка?

7.3.32. Перечислите шесть правил, соблюдение которых необходимо при выборе размеров прямоугольного провода.

7.3.33. Поясните способ намотки прямоугольного провода плашмя.

7.3.34. Поясните способ намотки прямоугольного провода на ребро.

7.3.35. Какой из двух способов намотки прямоугольного провода имеет преимущество и чем это объясняется?

7.3.36. Как пользуются таблицей при выборе размеров прямоугольного провода при намотке плашмя?

7.3.37. Какие варианты решений возможны при выборе размеров прямоугольного провода при намотке плашмя?

7.3.38. Как пользуются таблицей при выборе размеров прямоугольного провода при намотке на ребро?

7.3.39. Какие варианты решений возможны при выборе размеров прямоугольного провода при намотке на ребро?

7.3.40. Как рассчитывается уточненный осевой размер обмотки?

7.3.41. Как рассчитывается уточненный осевой размер витка для любого из возможных вариантов после выбора размеров прямоугольного провода при намотке плашмя?

7.3.42. Как рассчитывается уточненный осевой размер витка для любого из возможных вариантов после выбора размеров прямоугольного провода при намотке на ребро?

7.3.43. Как рассчитывается радиальный размер однослойной обмотки при намотке провода плашмя?

7.3.44. Как рассчитывается радиальный размер однослойной обмотки при намотке провода на ребро?

7.3.45. Как рассчитывается радиальный размер двухслойной обмотки при намотке провода плашмя?

7.3.46. Как рассчитывается радиальный размер двухслойной обмотки при намотке провода на ребро?

7.3.47. В каком случае в двухслойной обмотке необходим масляный канал между слоями?

7.3.48. В каком случае в двухслойной обмотке необходима жесткая изоляция между слоями?

7.3.49. От чего зависит ширина масляного междуслойного канала двухслойной обмотки?

7.3.50. Назовите величину допустимой плотности теплового потока на охлаждаемой поверхности для двухслойной обмотки из медного провода.

7.3.51. Назовите величину допустимой плотности теплового потока на охлаждаемой поверхности для двухслойной обмотки из алюминиевого провода.

7.3.52. Как рассчитывается площадь поверхности охлаждения однослойной обмотки, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр?

7.3.53. Как рассчитывается площадь поверхности охлаждения двухслойной обмотки, без масляного междуслойного канала, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр?

7.3.54. Как рассчитывается площадь поверхности охлаждения двухслойной обмотки, с масляным междуслойным каналом, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр?

7.3.55. Сколько и каких поверхностей охлаждения у однослойной обмотки, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр?

7.3.56. Сколько и каких поверхностей охлаждения у двухслойной обмотки, без масляного междуслойного канала, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр?

7.3.57. Сколько и каких поверхностей охлаждения у двухслойной обмотки, с масляным междуслойным каналом, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр?

7.3.58. Как рассчитывается плотность теплового потока на поверхности обмотки?

Расчет винтовой обмотки

7.3.59. Назовите минимальную величину осевого размера горизонтального масляного охлаждающего канала.

7.3.60. Как определяется число ходов винтовой обмотки?

7.3.61. Как рассчитать ориентировочный осевой размер витка необходимый для обоснования числа ходов?

7.3.62. Каким может быть ориентировочный осевой размер витка из медного провода у одноходовой обмотки?

7.3.63. Каким может быть ориентировочный осевой размер витка из алюминиевого провода у одноходовой обмотки?

7.3.64. Каким может быть ориентировочный осевой размер витка из медного провода у двухходовой обмотки?

7.3.65. Каким может быть ориентировочный осевой размер витка из алюминиевого провода у двухходовой обмотки?

7.3.66. Как рассчитывается ориентировочный осевой размер витка двухходовой обмотки?

7.3.67. Как аналитически определяется ориентировочный осевой размер витка по допустимой плотности теплового потока на поверхности обмотки?

7.3.68. Как графически определяется ориентировочный осевой размер витка по допустимой плотности теплового потока на поверхности обмотки?

7.3.69. Как можно уменьшить площадь поверхности охлаждения одноходовой винтовой обмотки?

7.3.70. Как можно уменьшить площадь поверхности охлаждения двухходовой винтовой обмотки?

7.3.71. Перечислите пять условий, которые необходимо соблюсти при выборе провода винтовой обмотки.

7.3.72. Проиллюстрируйте сечение витка одноходовой обмотки из шести элементарных проводов.

7.3.73. Проиллюстрируйте сечение витка одноходовой обмотки из десяти элементарных проводов.

7.3.74. Для чего в винтовой обмотке необходима транспозиция?

7.3.75. Как рассчитывается радиальный размер винтовой обмотки?

7.3.76. Как рассчитывается уточненный осевой размер одноходовой винтовой обмотки?

7.3.77. Как рассчитывается уточненный осевой размер двухходовой винтовой обмотки?

7.3.78. Как выполняется транспозиция в винтовой обмотке?

Расчет цилиндрической многослойной обмотки из алюминиевой ленты

- 7.3.79. Поясните, что такое предельное число витков в катушке?
- 7.3.80. Как определяется предельное число витков в катушке?
- 7.3.81. Как определяется допустимый суммарный радиальный размер алюминиевой ленты?
- 7.3.82. Когда фаза обмотки может быть выполнена одной катушкой?
- 7.3.83. Какое число витков содержит каждая из катушек, если фаза обмотки выполняется в виде двух концентрических катушек?
- 7.3.84. Как выбирается толщина и ширина алюминиевой ленты?

Расчет цилиндрической многослойной обмотки из круглого провода

- 7.3.85. Какой параметр используется при выборе круглого провода?
- 7.3.86. Как рассчитывается число витков в слое?
- 7.3.87. Как рассчитывается осевой размер обмотки ВН после завершения расчета обмотки НН?
- 7.3.88. Как определяется число слоев обмотки?
- 7.3.89. Какие возможны варианты конструкции обмотки?
- 7.3.90. Как обосновывается конструкция обмотки из возможных вариантов?
- 7.3.91. Как определяется площадь поверхности охлаждения обмотки для выбранного варианта конструкции?
- 7.3.92. Как выбирается толщина междуслойной изоляции?
- 7.3.93. Что представляет собой междуслойная изоляция обмотки?
- 7.3.94. Как рассчитывается напряжение между витками соседних слоев?
- 7.3.95. Как определяется уточненный радиальный размер обмотки для выбранного варианта конструкции?
- 7.3.96. Назовите рекомендуемую плотность теплового потока для многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода.
- 7.3.97. Сколько и каких поверхностей охлаждения имеется у многослойной цилиндрической обмотки, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр?
- 7.3.98. Сколько и каких поверхностей охлаждения имеется у многослойной цилиндрической обмотки, намотанной на рейках?

7.3.99. Сколько и каких поверхностей охлаждения имеется у многослойной цилиндрической обмотки с масляным каналом, намотанной непосредственно на изоляционный цилиндр?

7.3.100. Сколько и каких поверхностей охлаждения имеется у многослойной цилиндрической обмотки с масляным каналом, намотанной на рейках?

Расчет непрерывной катушечной обмотки из прямоугольного провода

7.3.101. Назовите диапазон номинальной мощности трансформаторов, у которых применяется данный тип обмотки.

7.3.102. Назовите диапазон классов напряжений обмоток трансформаторов, у которых применяется данный тип обмотки.

7.3.103. Как выбирается прямоугольный провод и что принимается при этом во внимание?

7.3.104. Как наматывается прямоугольный провод (плашмя или на ребро) в непрерывной катушечной обмотке?

7.3.105. Как определяется предельное значение большего размера прямоугольного провода?

7.3.106. Какое значение плотности теплового потока используется при определении предельного значения большего размера прямоугольного провода?

7.3.107. Перечислите пять требований, которые необходимо соблюдать при выборе прямоугольного провода?

7.3.108. Что рекомендуется делать при выборе прямоугольного провода для получения более компактной конструкции обмоток?

7.3.109. Какой величиной ограничивается отличие радиальных размеров катушек?

7.3.110. Как обеспечивается допустимое отличие радиальных размеров катушек?

7.3.111. Зачем ограничивается отличие радиальных размеров катушек?

7.3.112. Когда возможно уменьшение количества радиальных каналов и выполнение двойных катушек?

7.3.113. Поясните конструкцию двойной катушки.

7.3.114. Проиллюстрируйте сечение витка непрерывной катушечной обмотки, состоящего из нескольких элементарных проводников.

7.3.115. Когда и зачем выполняется транспозиция витков непрерывной катушечной обмотки?

7.3.116. Как определяется количество витков в регулировочных, основных катушках и катушках с усиленной изоляцией?

7.3.117. Как определяется число регулировочных, основных катушек и катушек с усиленной изоляцией?

7.3.118. Для чего выполняются катушки с усиленной изоляцией? Поясните конструкцию катушки с усиленной изоляцией.

Расчет цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного провода

7.3.119. Назовите класс напряжения трансформаторов, у которых применяется цилиндрическая многослойная обмотка из прямоугольного провода.

7.3.120. Как и почему наматывается прямоугольный провод (плашмя или на ребро) в цилиндрической многослойной обмотке?

7.3.121. Как выбирается прямоугольный провод, что принимается при этом во внимание?

7.3.122. Как подтверждается необходимость наличия осевого охлаждающего канала?

7.3.123. Как распределяется число слоев обмотки ВН между катушками, разделенными осевым охлаждающим каналом?

7.3.124. Чем обосновывается отличие в числе слоев катушек, разделенных осевым масляным каналом?

7.3.125. Как определяется плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности обмотки?

7.3.126. Как можно изменить число слоев обмотки?

7.3.127. Как рассчитывается осевой размер обмотки на начальном этапе расчета?

7.3.128. Как рассчитывается уточненный осевой размер обмотки?

7.3.129. Проиллюстрируйте сечение витка многослойной цилиндрической обмотки, сформированное несколькими элементарными проводниками.

7.4. Определение параметров короткого замыкания

7.4.1. Что такое потери короткого замыкания и какие они имеют составляющие?

7.4.2. От каких параметров и каким образом зависят основные потери в обмотке трансформатора?

7.4.3. Как рассчитываются полные потери короткого замыкания?

7.4.4. Поясните от каких параметров и каким образом зависит коэффициент добавочных потерь обмоток?

7.4.5. Назовите нормируемое отклонение расчетного значения потерь короткого замыкания от заданного.

7.4.6. Изложите рассуждения, которыми целесообразно руководствоваться для устранения недопустимого отклонения расчетного значения потерь короткого замыкания от заданного.

7.4.7. Назовите два состояния трансформатора, находясь в которых он обладает номинальными потерями короткого замыкания.

7.4.8. Что такое напряжение короткого замыкания?

7.4.9. От каких параметров и каким образом зависят активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания?

7.4.10. Как и зачем проводится опыт короткого замыкания трансформатора?

7.4.11. Как получить небольшое изменение реактивной составляющей напряжения короткого замыкания?

7.4.12. Как получить существенное изменение реактивной составляющей напряжения короткого замыкания?

7.4.13. Как можно изменить электродвижущую силу витка?

7.4.14. Что такое аварийное короткое замыкание?

7.4.15. От чего возникают механические силы в обмотках?

7.4.16. Как действуют радиальные механические силы на обмотки НН и ВН?

7.4.17. На какие элементы конструкции обмоток действуют осевые механические силы?

7.4.18. Поясните наиболее неблагоприятное взаимное расположение обмоток НН и ВН по соображениям возникновения осевых механических сил.

7.4.19. Назовите предельно допустимые механические напряжения сжатия для провода медных и алюминиевых обмоток.

7.4.20. Назовите предельно допустимые механические напряжения на разрыв для провода медных и алюминиевых обмоток.

7.4.21. Назовите предельно допустимые механические напряжения сжатия на опорных поверхностях спроектированного трансформатора.

7.4.22. Назовите предельно допустимые температуры медных и алюминиевых обмоток при коротком замыкании трансформатора с масляным охлаждением.

7.5. Окончательный расчет магнитной системы

Определение параметров холостого хода

7.5.1. Перечислите наименования размеров магнитной системы трансформатора.

7.5.2. Как определить расстояние между осями соседних стержней?

7.5.3. Как определить длину стержня?

7.5.4. Как определить высоту ярма, ширину стержня?

7.5.5. Как определить ширину ярма, толщину пакетов стержня?

7.5.6. Что такое потери холостого хода?

7.5.7. Назовите предельное отклонение расчетного значения потерь холостого хода от заданного.

7.5.8. Как и зачем проводится опыт холостого хода трансформатора?

7.5.9. От каких параметров и каким образом зависят потери холостого хода?

7.5.10. От каких параметров и каким образом зависит ток холостого хода?

7.5.11. Изложите рассуждения, которыми целесообразно руководствоваться для устранения недопустимого отклонения расчетного значения потерь, тока холостого хода от заданных.

7.5.12. С какой целью сечения стержня и ярма выполняются ступенчатыми?

7.5.13. Как можно уменьшить массу магнитной системы проектируемого трансформатора?

7.6. Оценка эксплуатационных свойств трансформатора

7.6.1. От чего зависит изменение вторичного напряжения ΔU ?

7.6.2. Как сказываются положительное и отрицательное значения ΔU при увеличении нагрузки трансформатора на его вторичном напряжении?

7.6.3. Какому характеру нагрузки и при каком коэффициенте нагрузки соответствует наибольшее изменение вторичного напряжения трансформатора?

7.6.4. Как сказывается характер нагрузки на отклонении напряжения ΔU ?

7.6.5. Как сказывается отклонение напряжения ΔU на напряжении вторичной обмотки трансформатора?

7.6.6. При каком характере нагрузки отклонение напряжения максимальное?

7.6.7. От чего зависит коэффициент полезного действия трансформатора?

7.6.8. От чего зависит коэффициент нагрузки, при котором коэффициент полезного действия равен максимальной величине?

7.6.9. От чего зависит максимальное значение коэффициента полезного действия трансформатора?

7.6.10. Какой из двух понижающих трансформаторов с различными коэффициентами трансформации дополнительно нагружается уравнительным током?

7.6.11. Какой из двух повышающих трансформаторов с различными коэффициентами трансформации дополнительно нагружается уравнительным током?

7.6.12. Какой из двух понижающих трансформаторов с различными коэффициентами трансформации разгружается уравнительным током?

7.6.13. Какой из двух повышающих трансформаторов с различными коэффициентами трансформации разгружается уравнительным током?

7.6.14. Какое соотношение номинальных мощностей трансформаторов допускается ГОСТом при их включении на параллельную работу?

7.6.15. Какой из двух трансформаторов различных мощностей достигнет первым номинальной мощности при повышении нагрузки?

8. ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов.- 6 изд., стереотипное. – Издательский дом Альянс, 2009.-528 с.: ил.

2. СТО ТПУ 2.5.01-2011 Стандарт организации. Система образовательных стандартов. Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления.
3. Чешева Т.В., Винокурова Г.Ф., Стукач В.С. Конструирование трансформаторов. Учебное пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 1992.-116 с.: ил.
4. Расчет силовых трансформаторов с естественным масляным охлаждением: методические указания к выполнению курсового проекта / сост. В.М.Игнатович, В.В.Големгрейн. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.-52 с.
5. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник-4-е изд., испр. - М.: Высшая школа, 2009. – 607 с., ил.
6. Токарев Б.Ф. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1990.-624с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Форма титульного листа пояснительной записки

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Государственное образовательное учреждение высшего профессиональ-
ного образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Энергетический институт

Направление – «Электроэнергетика и электротехника»
Кафедра «Электромеханические комплексы и материалы»

**РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЧАСТИ И ОЦЕНКА
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Пояснительная записка к курсовому проекту по дисциплине
«Электрические машины»

ФЮРА 672000.XXX ПЗ

Студент (ка)

группы _____

(подпись, дата)

Ф.И.О.

Преподаватель

(подпись, дата)

Ф.И.О.

Томск – 20 _____

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Форма бланка задания

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Государственное образовательное учреждение высшего профессиональ-
ного образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Энергетический институт

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭКМ _____ А.С. Ивашутенко

« ____ » _____ 20 ____ г.

З А Д А Н И Е

по курсовому проектированию студенту

института _____ курса _____ группы _____

1. Тема проекта: **«РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЧАСТИ И ОЦЕНКА
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА»**

2. Срок начала проектирования _____

3. Срок сдачи студентом законченной работы _____

4. Исходные данные к проекту:

$S_{\text{н}} =$ _____ кВА;

$U_{\text{вн}} =$ _____ кВ;

$U_{\text{нн}} =$ _____ кВ;

$P_{\text{о}} =$ _____ кВт;

$P_{\text{к}} =$ _____ кВт;

$U_{\text{к}} =$ _____ %;

$i_0 =$ _____ %;

$m = 3$;

$f = 50 \text{ Гц}$;

охлаждение – естественное масляное;

режим работы- S1.

5. Документация: пояснительная записка, сборочный чертеж активной части

Дата выдачи задания _____

Руководитель _____ (подпись, дата)

Задание к выполнению принял _____ (дата, подпись студента)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Пример расчета

ЗАДАНИЕ

Мощность трансформатора $S_H=1600$ кВА; число фаз $m=3$; частота $f=50$ Гц. Номинальные напряжения обмоток: $U_{BH}=35$, кВ; $U_{HH}=3,15$, кВ. Режим работы продолжительный. Напряжение короткого замыкания $u_K=6,5\%$; потери короткого замыкания $P_K=18000$ Вт; потери холостого хода $P_0=3650$ Вт; ток холостого хода $i_0=1,4\%$.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Расчет проводим для трехфазного трансформатора стержневого типа.

Расчеты трансформатора выполняются по методике, изложенной в [1].

Мощность одной фазы и одного стержня:

$$S_\phi = S' = S_H / 3 = 1600 / 3 = 533,3, \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Номинальные (линейные) токи обмоток

$$\text{ВН: } I_2 = S_H / (\sqrt{3} \cdot U_{BH}) = 1600 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 35000) = 26,4, \text{ А};$$

$$\text{НН: } I_1 = S_H / (\sqrt{3} \cdot U_{HH}) = 1600 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 3150) = 293, \text{ А}.$$

Выбираем схемы и группу соединения обмоток Y/Y₀-0. Выбранные схемы предусмотрены Государственным стандартом и предназначены для трехфазных двухобмоточных трансформаторов. Фазные токи равны линейным.

Фазные напряжения обмоток при выбранной схеме соединения обмоток:

$$\text{ВН: } U_{\phi 2} = U_{BH} / \sqrt{3} = 35000 / \sqrt{3} = 20207, \text{ В};$$

$$\text{НН: } U_{\phi 1} = U_{HH} / \sqrt{3} = 3150 / \sqrt{3} = 1819, \text{ В}.$$

Выбираем испытательные напряжения обмоток по табл. 4.1: для обмотки ВН $U_{исп}=85$ кВ; для обмотки НН $U_{исп}=18$ кВ.

Согласно рекомендациям §1.1, в целях экономии электролитической меди, в виду большей распространенности и доступности алюминия, принимаем материал обмоток – алюминий.

По табл. 5.8 выбираем предварительно тип обмоток:

обмотка ВН при напряжении 35 кВ и токе 26,4 А – цилиндрическая многослойная из прямоугольного алюминиевого провода;

обмотка НН при напряжении 3,15 кВ и токе 293 А – цилиндрическая многослойная из прямоугольного алюминиевого провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН $U_{исп}=85$ кВ по табл. 4.5 находим изоляционные расстояния: $a_{12_{экр}}=30$ мм, т.к. необходим электростатический экран; $l_{02}=75$ мм; $\delta_{12}=5$ мм; $a_{22}=30$ мм; $l_{y2}=50$ мм; $\delta_{22}=3$ мм; $\delta_{и1}=2$ мм.

Для испытательного напряжения обмотки НН $U_{исп}=18$ кВ по таблице 4.4 находим изоляционные расстояния: $a_{01}=15$ мм; $l_{01}=75$ мм; $\delta_{01}=4$ мм; $a_{y1}=6$ мм; $l_{y1}=25$ мм.

Расположение главной изоляции обмоток ВН и НН представлено на рисунке 1.

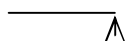


Рис.1. Главная изоляция обмоток ВН и НН

Ширина приведенного канала рассеяния a_p :

$$a_p = a_{12_{экр}} + (a_1 + a_2)/3 = 0,030 + 0,0306 = 0,0606, \text{ м,}$$

$$\text{где } (a_1 + a_2)/3 = k \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2} = 0,638 \sqrt[4]{533,3} \cdot 10^{-2} = 0,0306, \text{ м,}$$

$$k = 1,25 \cdot 0,51 = 0,638, \text{ по табл. 3.3.}$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_a = P_K / (10 \cdot S_H) = 18000 / 10 \cdot 1600 = 1,125, \text{ \%}.$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_p = \sqrt{u_K^2 - u_a^2} = \sqrt{6,5^2 - 1,125^2} = 6,4, \text{ \%}.$$

Согласно указаниям §2.3 выбираем трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и

прямыми стыками на среднем стержне. План шихтовки представлен на рис. 2. Материал магнитной системы – холоднокатаная текстурованная рулонная электротехническая сталь марки 3404 толщиной 0,30 мм.

Индукция в стержне $B_c = 1,62$ Тл согласно рекомендациям табл. 2.4.

В сечении стержня восемь ступеней, коэффициент заполнения круга $k_{кр} = 0,928$, согласно табл. 2.5; изоляция пластин – нагревостойкое изоляционное покрытие; коэффициент заполнения сечения стержня электротехнической сталью $k_z = 0,96$, по табл. 2.2.

Рис.2. План шихтовки магнитной системы

Коэффициент заполнения сталью: $k_c = k_{кр} k_z = 0,96 \cdot 0,928 = 0,891$.

Ярмо многоступенчатое, число ступеней шесть, коэффициент усиления ярма $k_y = 1,027$, по табл. 8.7.

Индукция в ярме: $B_y = B_c / k_y = 1,62 / 1,027 = 1,58$, Тл.

Число зазоров в магнитной системе: на косом стыке четыре, на прямом три. Индукция в зазоре на прямом стыке: $B_z'' = B_c = 1,62$, Тл; на косом стыке $B_z' = B_c / \sqrt{2} = 1,62 / \sqrt{2} = 1,146$, Тл.

По табл. 8.10 определяем удельные потери в электротехнической стали: в стержнях $\rho_c = 1,278$ Вт/кг; в ярмах $\rho_y = 1,190$ Вт/кг.

По табл. 8.17 удельные намагничивающие мощности: в стержнях $q_c = 1,850$ ВА/кг; в ярмах $q_y = 1,600$ ВА/кг; для немагнитных зазоров в прямых стыках $q_z'' = 25100$ ВА/м²; для немагнитных зазоров в косых стыках $q_z' = 3190$ ВА/м².

По табл. 3.6 находим коэффициент, учитывающий отношение основных потерь в обмотках к потерям короткого замыкания $k_\partial = 0,91$ и по табл. 3.4 и 3.5 – постоянные коэффициенты для алюминиевых обмоток: $a = 1,40 \cdot 1,06 = 1,484$; $b = 0,31 \cdot 1,25 = 0,388$. Принимаем коэффициент Рогов-

ского $k_p=0,95$ (коэффициент приведения идеализированного поля рассеяния к реальному).

2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

По формулам (3.30), (3.36), (3.43), (3.44), (3.52), (3.65) находим коэффициенты:

$$A = 0,5074 \sqrt{\frac{S' a_p k_p}{f u_p B_c^2 k_c^2}} = 0,5044 \sqrt{\frac{533,3 \cdot 0,0606 \cdot 0,95}{50 \cdot 6,4 \cdot 1,62^2 \cdot 0,891^2}} = 0,235;$$

$$A_1 = 5,633 \cdot 10^4 k_c A^3 a = 5,633 \cdot 10^4 \cdot 0,891 \cdot 0,235^3 \cdot 1,484 = 964,7, \text{ кг};$$

$$A_2 = 3,605 \cdot 10^4 k_c A^2 l_0 = 3,605 \cdot 10^4 \cdot 0,891 \cdot 0,235^2 \cdot 0,075 = 132,9, \text{ кг},$$

где $l_0 = 0,5(l_{01} + l_{02}) = 0,5(0,075 + 0,075) = 0,075, \text{ м};$

$$\begin{aligned} B_1 &= 2,4 \cdot 10^4 k_c k_{\text{я}} A^3 (a + b + e) = \\ &= 2,4 \cdot 10^4 \cdot 0,891 \cdot 1,027 \cdot 0,235^3 (1,40 + 0,31 + 0,41) = 529,7, \text{ кг}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_2 &= 2,4 \cdot 10^4 k_c k_{\text{я}} A^2 (a_{12_{\text{экр}}} + a_{22}) = \\ &= 2,4 \cdot 10^4 \cdot 0,891 \cdot 1,027 \cdot 0,235^2 (0,030 + 0,030) = 72,7, \text{ кг}; \end{aligned}$$

$$C_1 = \frac{1,2 \cdot 10^{-2} S_H a^2}{k_{\partial} k_c^2 B_c^2 u_a A^2} = \frac{1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1600 \cdot 1,484^2}{0,91 \cdot 0,891^2 \cdot 1,62^2 \cdot 1,125 \cdot 0,235^2} = 359,4, \text{ кг};$$

$$\begin{aligned} M &= 0,156 \cdot 10^{-6} k_{\kappa,3}^2 k_{\partial} k_p \frac{P_K}{aA} = \\ &= 0,156 \cdot 10^{-6} \cdot 34,19^2 \cdot 0,91 \cdot 0,95 \frac{18000}{1,484 \cdot 0,235} = 8,14, \text{ МПа} \end{aligned}$$

$$\text{где } k_{\kappa,3} = 1,41 \frac{100}{u_K} (1 + e^{-\pi u_a / u_p}) = 1,41 \frac{100}{6,5} (1 + e^{-\pi \cdot 1,125 / 6,4}) = 34,19.$$

В современных экономических условиях определяющими факторами оптимизации трансформаторов являются снижение относительной массы, уменьшение габаритов, затрат материалов и повышение энергетических показателей. Определение основных размеров трансформатора проведем по ускоренному методу.

По табл. 2.5 принимаем рекомендованный диаметр стержня $d=0,25$, м.

$$x = d / A = 0,25 / 0,235 = 1,064;$$

$$x^2 = 1,064^2 = 1,133; \quad x^3 = 1,064^3 = 1,206;$$

$$\beta = x^4 = 1,064^4 = 1,2836.$$

Значение β лежит в рекомендованном табл. 3.12 пределе – 1,2÷3,6.

Масса стержней магнитной системы:

$$G_c = \frac{A_1}{x} + A_2 x^2 = \frac{964,7}{1,064} + 132,9 \cdot 1,133 = 1057,25, \text{ кг.}$$

Масса ярм магнитной системы:

$$G_y = B_1 x^3 + B_2 x^2 = 649,1 \cdot 1,206 + 72,7 \cdot 1,133 = 865,184, \text{ кг.}$$

Масса магнитной системы:

$$G_{cm} = G_c + G_y = 1057,25 + 865,184 = 1922,434, \text{ кг.}$$

Масса одного угла магнитной системы по формуле (3.45a):

$$G_y = 0,492 \cdot 10^4 k_c k_y A^3 x^3 =$$

$$= 0,492 \cdot 10^4 \cdot 0,891 \cdot 1,027 \cdot 0,235^3 \cdot 1,206 = 70,32, \text{ кг.}$$

Активное сечение стержня по формуле (3.59):

$$P_c = 0,785 k_c A^2 x^2 = 0,785 \cdot 0,9 \cdot 1,03 \cdot 0,235^2 \cdot 1,133 = 0,0437, \text{ м}^2.$$

Площадь зазора:

$$\text{на прямом стыке } P_z'' = P_c = 0,0438, \text{ м}^2;$$

$$\text{на косом стыке } P_z' = P_c \sqrt{2} = 0,0618, \text{ м}^2.$$

Для выбранной магнитной системы (рис. 2) потери холостого хода рассчитывают по формуле (8.33):

$$P_0 = k_{n,\partial} \rho_c (G_c + 0,5 k_{n,y} G_y) + k_{n,\partial} \rho_y (G_y - 6 G_y + 0,5 k_{n,y} G_y) =$$

$$= 1,15 \cdot 1,278 (G_c + 0,5 \cdot 10,45 G_y) + 1,15 \cdot 1,190 (G_y - 6 G_y + 0,5 \cdot 10,45 G_y) =$$

$$= 147 G_c + 1,37 G_y + 6,62 G_y = 1,47 \cdot 1057,25 + 1,37 \cdot 865,184 + 6,62 \cdot 70,32 =$$

$$= 3205, \text{ Вт.}$$

$$P_0 = 3205, \text{ Вт} < 3650, \text{ Вт.}$$

Расчетное значение потерь холостого хода меньше заданного, что удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к трансформаторам.

Намагничивающая мощность по формуле (8.44):

$$Q_0 = k_{m,\partial} k_{m,\partial}'' q_c (G_c + 0,5 k_{m,y} k_{m,нл} G_y) + k_{m,\partial} k_{m,\partial}'' q_y (G_y - 6 G_y +$$

$$+ 0,5 k_{m,y} k_{m,нл} G_y) + k_{m,\partial}'' \sum q_3 n_3 P_z =$$

$$\begin{aligned}
&= 1,20 \cdot 1,07 \cdot 1,850(G_c + 0,5 \cdot 41,7 \cdot 1,4G_y) + 1,20 \cdot 1,07 \cdot 1,600(G_{\text{я}} - 6G_y + \\
&+ 0,5 \cdot 41,7 \cdot 1,4G_y) + \\
&+ 1,07 \cdot 3190 \cdot 4 \cdot 0,0618 + 1,07 \cdot 25100 \cdot 3 \cdot 0,0437 = \\
&= 2,38G_c + 2,05G_{\text{я}} + 117G_y + 4366,6 = \\
2,38 \cdot 1057,25 + 2,05 \cdot 865,184 + 117 \cdot 70,32 + 4366,6 &= 16883,92, \text{ В} \cdot \text{А}.
\end{aligned}$$

$$\text{Ток холостого хода: } i_0 = \frac{Q_0}{10S_H} = \frac{16883,92}{10 \cdot 1600} = 1,055\% < 1,4\%.$$

Расчетное значение тока холостого хода меньше заданного, что удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к трансформаторам.

Плотность тока:

$$J = \sqrt{\frac{k_{\partial} P_K}{12,75G_0}} \cdot 10^6 = \sqrt{\frac{0,91 \cdot 18000}{12,75 \cdot 317,21}} \cdot 10^6 = 2,013 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 < 2,7 \text{ МА/м}^2,$$

$$\text{где } G_0 = \frac{C_1}{x^2} = \frac{359,4}{1,133} = 317,21, \text{ кг - масса металла обмоток.}$$

Механические напряжения на разрыв в обмотках:

$$\sigma_p = Mx^3 = 8,14 \cdot 1,206 = 9,82, \text{ МПа} < 25 \text{ МПа.}$$

Диаметр стержня $d = 0,25, \text{ м.}$

Активное сечение стержня $П_c = 0,0438 \text{ м}^2.$

Средний диаметр обмоток

$$d_{12} = aAx = 1,484 \cdot 0,2349 \cdot 1,064 = 0,371, \text{ м.}$$

Высота обмоток $l = \pi d_{12} / \beta = \pi \cdot 0,371 / 1,2836 = 0,905, \text{ м.}$

Высота стержня $l_c = l + 2l_0 = 0,905 + 2 \cdot 0,075 = 1,055, \text{ м.}$

Расстояние между стержнями

$$C = d_{12} + a_{12} + bd + a_{22} = 0,371 + 0,030 + 0,388 \cdot 0,25 + 0,03 = 0,530, \text{ м.}$$

Электродвижущая сила одного витка

$$u_{\text{в}} = 4,44 \cdot f П_c B_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,0438 \cdot 1,62 = 15,72, \text{ В.}$$

ВЫВОД: выбраны материалы магнитной системы и обмоток, произведен расчет основных размеров трансформатора. Предварительные расчетные значения потерь и тока холостого хода удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к трансформаторам.

3. РАСЧЕТ ОБМОТОК НН и ВН

3.1. Расчет обмотки НН

Число витков на одну фазу обмотки НН

$$w_1 = U_{\phi 1} / (4,44 \cdot f \Pi_c B_c) = 1819 / 4,44 \cdot 50 \cdot 0,0438 \cdot 1,62 = \\ = 1819 / 15,75 = 115,49$$

Принимаем $w_1 = 116$ витков.

Уточняем:

$$\text{напряжение одного витка } u_{\phi} = U_{\phi 1} / w_1 = 1819 / 116 = 15,68, \text{ В;}$$

действительную индукцию в стержне

$$B_c = u_{\phi} / (4,44 \cdot f \Pi_c) = 15,68 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,0437) = 1,615, \text{ Тл.}$$

Значение индукции находится в рекомендуемом пределе $B_c = 1,55 \div 1,65$, Тл по табл. 2.4.

Средняя плотность тока в обмотках по формуле (5.4)

$$J_{cp} = 0,463 k_{\partial} \frac{P_K u_{\phi}}{S_H d_{12}} 10^4 = 0,463 \cdot 0,91 \frac{18000 \cdot 15,68}{1600 \cdot 0,371} 10^4 = 2,003, \text{ МА/м}^2.$$

Значение плотности тока удовлетворяет рекомендованному интервалу табл. 5.7.

Сечение витка ориентировочно

$$\Pi'_{\phi 1} \approx I_1 / J_{cp} = 293 / (2,003 \cdot 10^6) = 146,3 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

По табл. 5.8 по мощности 1600 кВА, току на один стержень 293 А, номинальному напряжению обмотки 3150 В и сечению витка подтверждаем предварительный выбор конструкции обмотки НН, как цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного алюминиевого провода. Обмотку НН принимаем из четырех слоев. Тогда число витков в одном слое $w_{cl1} = w_1 / n_{cl} = 116 / 4 = 29$.

Ориентировочный осевой размер витка

$$h'_{\phi 1} = l_1 / (w_{cl1} + 1) = 0,905 / (29 + 1) = 0,0301, \text{ м,}$$

где $l_1 = l = 0.905 \text{ м.}$

$$l_1 = l = 0.905 \text{ м.}$$

Принимаем сечение витка из двух элементарных проводов (табл. 5.2), т.к. нет табличного значения $b=30 \text{ мм.}$

Находим ориентировочный осевой размер провода без изоляции

$$b = (h'_{\text{с1}} / 2) - 2\delta = (0,0301 / 2) - 0,0005 = 0,0146, \text{ м.}$$

По полученным ориентировочным значениям $\Pi'_{\text{с1}}$ и b по табл. 5.2 подбираем сечение витка из двух параллельных проводов:

$\text{АПБ} - 2 \times \frac{5,30 \cdot 14,00}{5,80 \cdot 14,50}$ с сечением элементарного проводника $\Pi_1^{\text{II}} = 73,3, \text{ мм}^2$. Эскиз витка обмотки НН приведен на рис. 3.

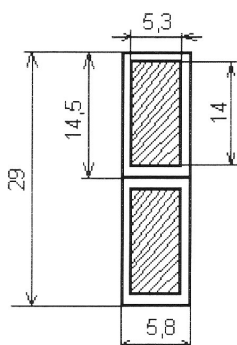


Рис. 3. Сечение витка обмотки НН

Полное сечение витка $\Pi_1 = n_{\text{эл}} \Pi_1^{\text{II}} = 2 \cdot 73,3 \cdot 10^{-6} = 146,6 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2$.

Плотность тока $J_1 = I_1 / \Pi_1 = 293 \cdot 10^6 / 146,6 = 2,00, \text{ МА/м}^2$.

Число витков в одном слое

$$w_{\text{с11}} = l_1 \cdot 10^3 / (h_{\text{с1}}) - 1 = 0,905 \cdot 10^3 / (2 \cdot 14,5) - 1 \approx 29.$$

Число слоев в обмотке $n_{\text{с11}} = w_1 / w_{\text{с11}} = 116 / 29 = 4$.

Высота обмотки

$$\begin{aligned} l_1 &= (h_{\text{с1}} \cdot 10^{-3})(w_{\text{с11}} + 1) + (0,005 \div 0,015) = \\ &= (2 \cdot 14,5 \cdot 10^{-3})(29 + 1) + (0,005 \div 0,015) = (0,875 \div 0,885), \text{ м.} \end{aligned}$$

Принимаем $l_1 = 0,880, \text{ м}$.

Общий суммарный предельный радиальный размер алюминиевых проводов по формуле (5.7)

$$\begin{aligned} b_{\text{дон}} &= qk_3 / (1,72J^2 \cdot 10^{-8}) = \\ &= 1200 \cdot 0,75 / (1,72 \cdot (2,00 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 10^{-8}) = 0,0131, \text{ м,} \end{aligned}$$

где $q=1200 \text{ Вт/м}^2$ - предельно допустимое значение плотности теплового потока.

Общий радиальный размер металла обмотки

$an_{cl1} = 5,3 \cdot 10^{-3} \cdot 4 = 21,2 \cdot 10^{-3}$, м больше предельно допустимого, поэтому обмотку разделяем на две концентрические катушки – внутреннюю А и внешнюю Б, по два слоя в каждой.

Между катушками осевой охлаждающий канал шириной

$$a'_{11} = 0,01l_1 = 0,01 \cdot 0,880 = 0,009, \text{ м.}$$

Напряжение двух слоев обмотки

$$U_{mcl1} = 2w_{cl1}u_v = 2 \cdot 29 \cdot 15,68 = 910, \text{ В.}$$

Междуслойная изоляция по табл. 4.7 – кабельная бумага марки К-120 по ГОСТ23436-83Е, два слоя, выступ изоляции 10 мм с каждого торца обмотки.

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = [a' \cdot n_{cl1} + \delta_{mcl1}(n_{cl1} - 2) + a'_{11}] \cdot 10^{-3} = \\ = [5,8 \cdot 4 + 0,24(4 - 2) + 9] \cdot 10^{-3} = 0,0327, \text{ м.}$$

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = d + 2a_{01} = 0,25 + 2 \cdot 0,015 = 0,280, \text{ м.}$$

Внешний диаметр обмотки

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1 = 0,280 + 2 \cdot 0,0327 = 0,345, \text{ м.}$$

Согласно табл. 4.4 обмотка НН наматывается на бумажно-бакелитовом цилиндре с размерами

$$\otimes \frac{0,260}{0,268} \times 0,900, \text{ м.}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки по формуле (7.19)

$$q_1 = \frac{P_{очн1} k_{\partial 1}}{\Pi_{o1}} = \frac{6891 \cdot 1,036}{7,77} = 918, \text{ Вт/м}^2 < 1200 \text{ Вт/м}^2.$$

где потери основные

$$P_{очн1} = 12,75 \cdot 10^{-12} J_1^2 G_{o1} = 12,75 \cdot 10^{-12} (2,00 \cdot 10^6)^2 \cdot 135,12 = 6891, \text{ Вт;}$$

масса металла обмотки

$$G_{o1} = 8,47 \cdot 10^3 c D_{1cp} w_1 \Pi_1 = 8,47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 0,32 \cdot 116 \cdot 146,6 \cdot 10^{-6} = 135,12, \text{ кг;}$$

где $D_{1cp} = (D'_1 + D''_1) / 2 = (0,280 + 0,345) / 2 = 0,32, \text{ м;}$

коэффициент добавочных потерь

$$k_{o1} = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \beta_1^2 a^4 n^2 = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot 0,876^2 \cdot 5,3^4 \cdot 10^{-12} \cdot 4^2 = 1,036$$

$$\beta_1 = \frac{bmk_p}{l_1} = \frac{14,0 \cdot 10^{-3} \cdot 58 \cdot 0,95}{0,880} = 0,876;$$

$$m = w_{cl1} n_{e1} = 29 \cdot 2 = 58;$$

поверхность охлаждения

$$\Pi_{o1} = \pi k_3 \pi (D_1' + D_1'') l_1 = 3 \cdot 2,0 \cdot 0,75 \cdot \pi \cdot (0,280 + 0,345) \cdot 0,880 = 7,77, \text{ м}^2.$$

Масса провода по табл. 5.5

$$G_{np1} = G_{o1} + (3,3 \cdot 1,5 / 100) \cdot G_{o1} = 135,12 + 0,0495 \cdot 135,12 = 141,81, \text{ кг}.$$

3.1. Расчет обмотки ВН

Выбираем схему регулирования по рис. 4 [1] с выводом концов всех трех фаз обмотки к одному трехфазному переключателю. Контакты переключателя рассчитываются на рабочий ток 26,4 А. Наибольшее напряжение между контактами переключателя в одной фазе: рабочее $10/\sqrt{3}\%U_2$, т.е. 2020 В; испытательное $2 \cdot 10/\sqrt{3}\%U_2$, т.е. 4040 В.

Рис. 4. Схема регулирования напряжения обмотки ВН

Число витков в обмотке ВН при номинальном напряжении

$$w_{n2} = U_{\phi 2} / u_{\phi} = 20207 / 15,68 = 1289.$$

Число витков на одной ступени регулирования

$$w_p = \Delta U / (\sqrt{3} u_{\phi}) = 875 / (\sqrt{3} \cdot 16,63) \approx 32,$$

где $\Delta U = 0,025 U_{ВН} = 0,025 \cdot 35000 = 875, \text{ В}.$

Для пяти ступеней:

Напряжение, В	Число витков на ответвлениях
36750	$1289+2\cdot 32=1353$
35875	$1289+32=1321$
35000	1289
34125	$1289-32=1257$
33250	$1289-2\cdot 32=1225$

Ориентировочная плотность тока

$$J'_2 = 2J_{cp} - J_1 = 2 \cdot 2,003 \cdot 10^6 - 2,00 \cdot 10^6 = 2,006, \text{ МА/м}^2.$$

Ориентировочное сечение витка

$$\Pi'_2 \approx I_2 / J'_2 = 26,4 / (2,006 \cdot 10^6) = 13,16 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

По табл. 5.8 подтверждаем предварительный выбор цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного алюминиевого провода ($S_H=1600$ кВА, $I_2=26,4$ А; $U_2=35000$ В, $\Pi'_2=13,16 \cdot 10^{-6}$ м²). Обмотку ВН принимаем из 12-ти слоев. Тогда число витков в одном слое

$$w_{cl2} = w_2 / n_{cl2} = 1353 / 12 = 113.$$

Ориентировочный осевой размер витка

$$h'_{\epsilon 2} = l_2 / (w_{cl2} + 1) = 0,880 / (113 + 1) = 0,0077, \text{ м}$$

при $l_2 = l_1 = 0,880$, м, т.к. $l_{01} = l_{02}$.

Принимаем сечение витка из одного элементарного проводника, тогда его ориентировочный размер без изоляции

$$b = h'_{\epsilon 2} - 2\delta = 0,0077 - 0,0005 = 0,0072, \text{ м}.$$

По полученным ориентировочным значениям Π'_2 и b по табл. 5.2 подбираем сечение витка из одного параллельного провода

$$АПБ - 1 \times \frac{2,00 \cdot 7,10}{2,50 \cdot 7,60} \text{ с сечением элементарного витка } \Pi''_2 = 13,8 \text{ мм}^2.$$

Эскиз сечения витка обмотки ВН приведен на рис. 5.

Плотность тока в обмотке ВН

$$J_2 = I_2 / \Pi_2 = 26,4 / (13,8 \cdot 10^{-6}) = 1,915, \text{ МА/м}^2.$$

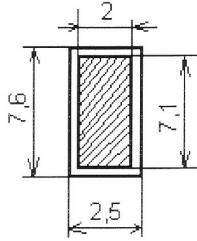


Рис. 5. Сечение витка обмотки ВН

Число витков в одном слое

$$w_{сл2} = l_2 \cdot 10^3 / (n_{с2} b') - 1 = 0,880 \cdot 10^3 / (1 \cdot 7,60) - 1 \approx 113.$$

Число слоев в обмотке $n_{сл2} = w_2 / w_{сл2} = 1353 / 113 \approx 12$.

Общий суммарный предельный радиальный размер алюминиевых проводов по формуле (5.7)

$$b_{дон} = q k_3 / (1,72 J^2 \cdot 10^{-8}) = \\ = 1200 \cdot 0,8 / (1,72 \cdot (1,915 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 10^{-8}) = 0,0152, \text{ м},$$

где $q=1200 \text{ Вт/м}^2$ - предельно допустимое значение плотности теплового потока.

Обмотки наматываются в 12 слоев. Девять слоев по 113 витков и три слоя по 112 витков. Всего 1353 витка. Общий радиальный размер металла обмотки больше допустимого: $b = n_{сл} \cdot a = 12 \cdot 0,002 = 0,024 \text{ м}$, поэтому обмотку разделяем на две концентрические катушки – внутреннюю (не более $1/3 \div 2/5$) $n_{сл}$, в четыре слоя, и внешнюю Г в восемь слоев. Между катушками осевой охлаждающий канал шириной

Для защиты от импульсных напряжений под внутренний слой обмотки устанавливается экран – разрезанный по образующей цилиндр из алюминиевого листа толщиной 0,5мм. Экран изолируется с двух сторон кабельной бумагой. Общая толщина экрана с изоляцией 3мм.

Напряжение двух слоев обмотки

$$U_{мсл2} = 2 w_{сл2} u_v = 2 \cdot 113 \cdot 15,68 = 3544, \text{ В}.$$

Междуслойная изоляция по табл. 4.7 – кабельная бумага марки К-120 по ГОСТ23436-83Е, 6 слоев, выступ изоляции 22 мм с каждого торца обмотки.

Радиальный размер обмотки

$$a_2 = [a' \cdot n_{сл2} + \delta_{мсл2} (n_{сл2} - 2) + a_{22}''] \cdot 10^{-3} = \\ = [2,5 \cdot 12 + 0,72(12 - 2) + 9] \cdot 10^{-3} = 0,0462, \text{ м},$$

где $a_{22}'' = 0,01 l_2 = 0,01 \cdot 0,880 = 0,009, \text{ м}$.

Внутренний диаметр обмотки

$$D_2' = D_1'' + 2a_{12экp} = 0,345 + 2 \cdot 0,030 = 0,405, \text{ м.}$$

Внешний диаметр обмотки

$$D_2'' = D_2' + 2a_2 = 0,405 + 2 \cdot 0,0462 = 0,497, \text{ м.}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки по формуле (7.19)

$$q_2 = \frac{P_{осн2} k_{\partial 2}}{\Pi_{o2}} = \frac{10009 \cdot 1,006}{11,969} = 841, \text{ Вт/м}^2 < 1200 \text{ Вт/м}^2,$$

где потери основные

$$\begin{aligned} P_{осн2} &= 12,75 \cdot 10^{-12} J_2^2 G_{o2} = \\ &= 12,75 \cdot 10^{-12} (1,915 \cdot 10^6)^2 \cdot 214,07 = 10009, \text{ Вт;} \end{aligned}$$

масса металла обмотки

$$\begin{aligned} G_{o2} &= 8,47 \cdot 10^3 c D_{2cp} w_2 \Pi_2 = \\ &= 8,47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot [(0,405 + 0,497) / 2] \cdot 1353 \cdot 13,8 \cdot 10^{-6} = 214,07, \text{ кг,} \end{aligned}$$

коэффициент добавочных потерь

$$\begin{aligned} k_{\partial 2} &= 1 + 0,037 \cdot 10^8 \beta_2^2 a^4 n^2 = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot 0,750^2 \cdot 0,002^4 \cdot 10^{-12} \cdot 12^2 = \\ &= 1,006, \end{aligned}$$

$$\beta_2 = \frac{bmk_p}{l_2} = \frac{7,10 \cdot 10^{-3} \cdot 113 \cdot 0,95}{0,880} = 0,750,$$

$$m = w_{cl2} n_{\partial 2} = 113 \cdot 1 = 113,$$

поверхность охлаждения

$$\begin{aligned} \Pi_{o2} &= cnk_3 \pi (D_2' + D_2'') l_2 = \\ &= 3 \cdot 2,0 \cdot 0,80 \cdot \pi \cdot (0,405 + 0,497) \cdot 0,880 = 11,969, \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Масса провода по табл. 5.5

$$G_{np2} = G_{o2} + (3,3 \cdot 3 / 100) \cdot G_{o2} = 214,07 + 0,099 \cdot 214,07 = 235,26, \text{ кг}$$

Согласно табл. 4.5 обмотка ВН наматывается на бумажно-бакелитовом цилиндре с размерами $\otimes \frac{0,375}{0,388} \times 0,924, \text{ м.}$

ВЫВОД: окончательно выбрали конструкции обмоток НН и ВН, подобрали сечения проводов и оценили тепловое состояние спроектированных обмоток. У обоих обмоток расчетные значения плотностей теп-

лового потока не превышают предельно допустимого значения в 1200 Вт/м², значит обмотки спроектированы верно.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

4. 1. Определение потерь короткого замыкания

Потери короткого замыкания определяются согласно §7.1. Основные потери, рассчитанные ранее:

обмотка НН $P_{оч1} = 6891$, Вт;

обмотка ВН $P_{оч2} = 10009$, Вт.

Коэффициенты добавочных потерь, рассчитанные ранее:

обмотка НН $k_{\partial1} = 1,036$;

обмотка ВН $k_{\partial2} = 1,006$.

Основные потери в отводах. Длина отводов определяется приближенно по формуле (7.21)

$$l_{отв} = l_{отв1} = l_{отв2} = 7,5l_1 = 7,5 \cdot 0,880 = 6,60, \text{ м.}$$

Масса отводов НН

$$G_{отв1} = l_{отв} \Pi_{отв1} \gamma = 6,60 \cdot 146,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 2,61, \text{ кг.}$$

Потери в отводах НН

$$P_{отв1} = 12,75 \cdot 10^{-12} J_1^2 G_{отв1} = 12,75 \cdot 10^{-12} (2,00 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,61 = 133, \text{ Вт.}$$

Масса отводов ВН

$$G_{отв2} = l_{отв} \Pi_{отв2} \gamma = 6,60 \cdot 13,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 0,25, \text{ кг.}$$

Потери в отводах ВН

$$P_{отв2} = 12,75 \cdot 10^{-12} J_2^2 G_{отв2} = 12,75 \cdot 10^{-12} (1,915 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,25 = 12, \text{ Вт.}$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкции определяем приближенно по формуле (7.25)

$$P_{\sigma} = 10kS_{\mu} = 10 \cdot 0,03 \cdot 1600 = 480, \text{ Вт.}$$

Полные потери короткого замыкания

$$\begin{aligned} P_K &= P_{оч1} k_{\partial1} + P_{оч2} k_{\partial2} + P_{отв1} + P_{отв2} + P_{\sigma} = \\ &= 6891 \cdot 1,036 + 10009 \cdot 1,006 + 133 + 12 + 480 = 17833, \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Для номинального числа витков обмотки ВН

$$P_K = P_K - 0,05 P_{оч2} k_{\partial2} = 17833 - 0,05 \cdot 10009 \cdot 1,006 = 17330, \text{ Вт}$$

$$P_K = 17330, \text{ Вт} < 18000, \text{ Вт.}$$

Расчетное значение потерь короткого замыкания меньше заданного, что удовлетворяет техническим требованиям по его отклонению ($\leq 5\%$).

4. 2. Определение напряжения короткого замыкания

Напряжение короткого замыкания рассчитывается согласно §7.2.

Активная составляющая

$$u_a = P_K / (10 \cdot S_H) = 17330 / 10 \cdot 1600 = 1,083, \%$$

Реактивная составляющая по формуле (7.32)

$$u_p = \frac{7,9 f S' \beta a_p k_p}{u_e^2} \cdot 10^{-1} =$$

$$= \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 533,3 \cdot 1,338 \cdot 0,0563 \cdot 0,961}{15,68^2} \cdot 10^{-1} = 6,203, \%$$

где $\beta = \frac{\pi d_{12}}{l} = \frac{\pi \cdot 0,375}{0,880} = 1,338;$

$$d_{12} = D_1^{//} + a_{12_{\text{экр}}} = 0,345 + 0,030 = 0,375, \text{ м};$$

$$a_p = a_{12_{\text{экр}}} + (a_1 + a_2) / 3 = 0,030 + (0,0327 + 0,0462) / 3 = 0,0563, \text{ м};$$

$$k_p = 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}) = 1 - 0,039(1 - e^{-1/0,039}) \approx 0,961;$$

$$\sigma = \frac{a_{12_{\text{экр}}} + a_1 + a_2}{\pi l} = \frac{0,030 + 0,0327 + 0,0462}{\pi \cdot 0,880} = 0,039.$$

Напряжение короткого замыкания

$$u_K = \sqrt{u_p^2 + u_a^2} = \sqrt{6,203^2 + 1,083^2} = 6,297\%.$$

$$\text{или } \Delta u_K = \frac{6,297 \cdot 100}{6,5} - 100 = -3,1\%.$$

ВЫВОД: Расчетное значение напряжения короткого замыкания меньше заданного. Расчетное значение напряжения короткого замыкания находится в границах допустимых отклонений ($\leq \pm 5\%$) от заданного.

5. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА

5. 1. Определение размеров магнитной системы и массы стали

Для расчета потерь и тока холостого хода нужны уточненные массы стали, которые определяются согласно §8.2, 8.3.

Принята конструкция трехфазной плоской шихтованной магнитной системы, собираемой из пластин холоднокатаной текстурованной стали марки 3404 толщиной 0,30 мм. Стержни магнитной системы скрепляются бандажами из стеклоленты, ярма прессуются ярмовыми балками. Размеры пакетов выбираются по таблице 8.3 для стержня диаметром $d=0,25$ м без прессующей пластины. Число ступеней в сечении стержня 8, в сечении ярма 6. Сечение стержня, ярма и основные размеры магнитной системы приведены на рис. 6.

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо (в половине поперечного сечения), мм
1	240×35	240×35
2	220×24	220×24
3	200×16	200×16
4	180×12	180×12
5	155×11	155×11
6	140×6	140×17
7	120×6	-
8	100×5	-

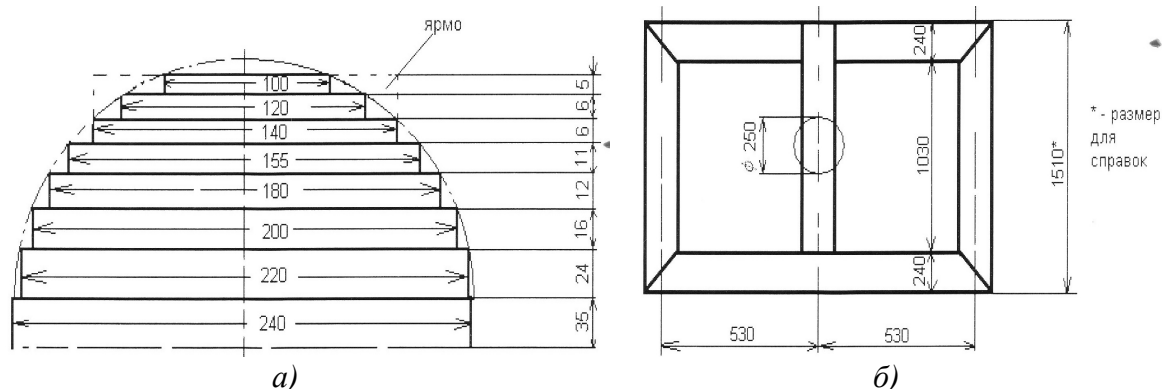


Рис. 6. Магнитная система спроектированного трансформатора:
а) сечение стержня и ярма; б) основные размеры магнитной системы

Общая толщина пакетов стержня (ширина ярма)

$$2 \cdot (35 + 24 + 16 + 12 + 11 + 6 + 6 + 5) \cdot 10^{-3} = 0,230, \text{ м.}$$

Площади ступенчатых фигур определяются по табл. 8.7:

$$\text{стержня } \Pi_{\phi, c} = 0,04562, \text{ м}^2; \text{ ярма } \Pi_{\phi, я} = 0,04626, \text{ м}^2.$$

Объем угла магнитной системы определяется по табл. 8.7

$$V_y = 0,009532, \text{ м}^3.$$

$$\text{Активное сечение стержня } \Pi_c = k_3 \Pi_{\phi, c} = 0,96 \cdot 0,04562 = 0,0438, \text{ м}^2.$$

$$\text{Активное сечение ярма } \Pi_я = k_3 \Pi_{\phi, я} = 0,96 \cdot 0,04626 = 0,04441, \text{ м}^2.$$

Объем угла стали магнитной системы

$$V_{y, cm} = k_3 V_y = 0,96 \cdot 0,009532 = 0,009151, \text{ м}^3,$$

где k_3 – коэффициент заполнения сечения стержня листовой электро-технической сталью.

$$\text{Длина стержня } l_c = l_2 + 2 \cdot l_{o2} = 0,880 + 2 \cdot 0,075 = 1,030, \text{ м.}$$

Расстояние между осями стержней

$$C = D_2'' + a_{22} \cdot 10^{-3} = 0,497 + 0,030 = 0,527, \text{ м.}$$

Принимаем $C = 0,530 \text{ м.}$

$$\text{Масса стали стержней } G_c = G_c' + G_c'' = 1035,37 + 31,25 = 1066,62, \text{ кг,}$$

$$\text{где } G_c' = 3 l_c \Pi_c \gamma_{cm} = 3 \cdot 1,030 \cdot 0,0438 \cdot 7650 = 1035,37, \text{ кг,}$$

$$G_c'' = 3(\Pi_c a_{1я} \gamma_{cm} - G_y) = 3 \cdot (0,0438 \cdot 0,240 \cdot 7650 - 70,0) = 31,25, \text{ кг,}$$

$$G_y = V_{y, cm} \gamma_{cm} = 0,009151 \cdot 7650 = 70,0, \text{ кг.}$$

Масса стали ярм

$$G_я = G_я' + G_я'' = 2 \Pi_я \cdot 2 C \gamma_{cm} + 2 G_y = 2 \cdot 0,04441 \cdot 2 \cdot 0,530 \cdot 7650 + 2 \cdot 70,0 = 720,24 + 140,0 = 860,24, \text{ кг.}$$

$$\text{Общая масса стали } G_{cm} = G_c + G_я = 1066,62 + 860,24 = 1926,86, \text{ кг.}$$

5.2. Определение потерь холостого хода

Индукция в стержне

$$B_c = \frac{u_\phi}{4,44 f \Pi_c} = \frac{15,68}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0438} = 1,615, \text{ Тл.}$$

Значение индукции находится в рекомендуемом интервале $B_c = 1,55 \div 1,65$ Тл по табл. 2.4.

Индукция в ярме

$$B_{\text{я}} = \frac{u_{\text{в}}}{4,44 f \Pi_{\text{я}}} = \frac{15,68}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,04441} = 1,590, \text{ Тл.}$$

Индукция на косом стыке

$$B_{\text{кос}} = B_{\text{с}} / \sqrt{2} = 1,615 / \sqrt{2} = 1,140, \text{ Тл.}$$

Площади сечения немагнитных зазоров на прямом стыке среднего стержня равны соответственно активным сечениям стержня и ярма.

Площадь сечения стержня в косом стыке

$$\Pi_{\text{кос}} = \sqrt{2} \Pi_{\text{с}} = \sqrt{2} \cdot 0,0438 = 0,0619, \text{ м}^2.$$

Удельные потери для стержней, ярм и стыков по табл. 8.10 для стали марки 3404 толщиной 0,35 мм при шихтовке в две пластины (для упрощения технологии изготовления):

при $B_{\text{с}}=1,615$ Тл $\rho_{\text{с}}=1,266$ Вт/кг; $\rho_{\text{с,з}}=1010$ Вт/м²;

при $B_{\text{я}}=1,590$ Тл $\rho_{\text{я}}=1,210$ Вт/кг; $\rho_{\text{я,з}}=976$ Вт/м²;

при $B_{\text{кос}}=1,140$ Тл $\rho_{\text{кос}}=464$ Вт/м².

Для плоской магнитной системы с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне с многоступенчатым ярмом, без отверстий для шпилек, с отжигом пластин после резки стали и удаления заусенцев для определения потерь холостого хода принимаем формулу (8.32).

На основании табл. 8.12 принимаем:

$k_{n,p}=1,05$ – коэффициент, учитывающий влияние техпроцесса резки;

$k_{n,z}=1,00$ – коэффициент, учитывающий удаление заусенцев;

$k_{n,y}=1,00$ – коэффициент, учитывающий форму сечения ярма;

$k_{n,n}=1,03$ – коэффициент, учитывающий влияние прессовки;

$k_{n,u}=1,05$ – коэффициент, учитывающий перешихтовку верхнего ярма остова при установке обмоток.

По табл. 8.13 находим коэффициент $k_{n,y}=10,45$, учитывающий общее увеличение удельных потерь в углах магнитной системы.

Потери холостого хода

$$\begin{aligned} P_0 &= [k_{n,p} k_{n,z} (\rho_{\text{с}} G_{\text{с}} + \rho_{\text{я}} G_{\text{я}} - 4 \rho_{\text{я}} G_{\text{y}} + \frac{\rho_{\text{с}} + \rho_{\text{я}}}{2} k_{n,y} G_{\text{y}}) + \sum \rho_{\text{з}} n_{\text{з}} \Pi_{\text{з}}] k_{n,y} k_{n,n} k_{n,u} = \\ &= [1,05 \cdot 1,00 (1,266 \cdot 1066,62 + 1,210 \cdot 720,24 - 4 \cdot 1,210 \cdot 70,0 + \\ &+ \frac{1,266 + 1,210}{2} 10,45 \cdot 70,0) + \\ &+ 4 \cdot 0,0619 \cdot 464 + 1,00 \cdot 0,0438 \cdot 1010 + 2 \cdot 0,04441 \cdot 976] \cdot 1,00 \cdot 1,03 \cdot 1,05 = \\ &= 3433, \text{ Вт} < 3650, \text{ Вт.} \end{aligned}$$

ВЫВОД: Расчетное значение потерь холостого хода меньше заданного. Расчетное значение потерь холостого хода находится в границах допустимого отклонения ($\leq + 7,5\%$) от заданного значения.

5.3. Определение тока холостого хода

Удельные намагничивающие мощности находим по табл. 8.17:

при $B_c=1,615$ Тл $q_c=1,810$ ВА/кг; $q_{c,z}=24700$ ВА/м²;

при $B_{я}=1,590$ Тл $q_{я}=1,644$ ВА/кг; $q_{я,z}=22800$ ВА/м²;

при $B_{кoc}=1,140$ Тл $q_{кoc}=3100$ ВА/м².

Для принятой конструкции магнитной системы и технологии ее изготовления используем формулу (8.43). Согласно табл. 8.12 и 8.21 принимаем коэффициенты:

$k_{m,p}=1,18$ – коэффициент, учитывающий влияние резки полосы рулона на пластины;

$k_{m,z}=1,00$ – коэффициент, учитывающий влияние срезания заусенцев;

$k_{m,nl}=1,40$ – коэффициент, учитывающий ширину пластин в углах магнитной системы;

$k_{m,y}=1,00$ – коэффициент, учитывающий форму сечения ярма;

$k_{m,n}=1,05$ – коэффициент, учитывающий прессовку магнитной системы;

$k_{m,u}=1,05$ – коэффициент, учитывающий расшихтовку верхнего ярма перед установкой обмоток.

По табл. 8.20 находим коэффициент $k_{m,y}=41,90$ – учитывающий количество углов с косыми и прямыми стыками в магнитной системе.

Намагничивающая мощность холостого хода

$$\begin{aligned} Q_0 &= [k_{m,p}k_{m,z}(q_c G_c + q_{я} G_{я} - 4q_{я} G_y + \frac{q_c + q_{я}}{2} k_{m,y} k_{m,nl} G_y) + 4q_{кoc} \Pi_{з,кoc} + 1q_{c,z} \Pi_c + \\ &+ 2q_{я,z} \Pi_{я}] k_{m,y} k_{m,n} k_{m,u} = \\ &= [1,18 \cdot 1,00 (1,810 \cdot 1066,62 + 1,644 \cdot 720,24 - 4 \cdot 1,644 \cdot 70,0 + \frac{1,810 + 1,644}{2} 41,90 \cdot 1,40 \cdot 70,0) + \\ &+ 4 \cdot 3100 \cdot 0,0619 + 1 \cdot 24700 \cdot 0,0438 + 2 \cdot 0,04441 \cdot 22800] \cdot 1,00 \cdot 1,05 \cdot 1,05 = \\ &= 16950, \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Ток холостого хода

$$i_0 = \frac{Q_0}{10S} = \frac{16950}{10 \cdot 1600} = 1,059, \% < 1,4, \%$$

ВЫВОД: Расчетное значение тока холостого хода меньше заданного. Расчетное значение тока холостого хода находится в границах допустимого отклонения ($\leq +15\%$) от заданного значения.

6. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРА

6.1. Внешние характеристики

Зависимости $U_{HH} = f(k_{H2})$, рассчитываем при питании обмотки ВН понижающего трансформатора номинальным напряжением номинальной частоты при изменении величины симметричной нагрузки и заданном значении, при активно-индуктивной нагрузке $\cos \varphi_2 = 0,7$, при активно-емкостной $\cos(-\varphi_2) = 0,8$.

При коэффициенте нагрузки трансформатора $k_{H2} = 1,0$ (работа при номинальной нагрузке):

- для активно-индуктивной нагрузки изменение напряжения трансформатора

$$\Delta U \approx k_{H2}(u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2) = 1,0 \cdot (1,083 \cdot 0,7 + 6,203 \cdot 0,714) = 5,187\%,$$

где u_a, u_p – расчетные значения активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания, %;

при $\cos \varphi_2 = 0,7$ $\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,7^2} = 0,714$, о.е.

Фазное (линейное) напряжение обмотки НН

$$U_{HH} = 100 - \Delta U = 100 - 5,187 = 94,813\%.$$

- для активно-емкостной нагрузки изменение напряжения трансформатора

$$\Delta U \approx k_{H2}(u_a \cos(-\varphi_2) + u_p \sin(-\varphi_2)) = 1,0 \cdot (1,083 \cdot 0,8 - 6,203 \cdot 0,6) = -2,855\%,$$

где при $\cos(-\varphi_2) = 0,8$

$$\sin(-\varphi_2) = -\sqrt{1 - \cos^2(-\varphi_2)} = -\sqrt{1 - 0,8^2} = -0,6$$
, о.е.

Фазное (линейное) напряжение обмотки НН

$$U_{HH} = 100 - \Delta U = 100 + 2,8554 = 102,8554\%.$$

Результаты расчета внешних характеристик при изменении коэффициента нагрузки в диапазоне значений $k_{H2} = 0 \div 1,25$ для обоих характеров нагрузки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов внешних характеристик трансформатора

Коэффициент нагрузки k_{H2} , о.е.	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
--------------------------------------	---	------	------	------	------	------

Активно-индуктивная $\cos \varphi_2 = 0,7$	$\Delta U, \%$	0	1,297	2,594	3,890	5,187	6,484
	$U_{HH}, \%$	100	98,703	97,406	96,11	94,813	93,516
Активно-емкостная $\cos(-\varphi_2) = 0,8$	$\Delta U, \%$	0	-0,714	-1,428	-2,142	-2,855	-3,569
	$U_{HH}, \%$	100	100,714	101,428	102,142	102,855	103,569

По результатам расчетов построим внешние характеристики трансформатора в одних осях координат (рис. 7).

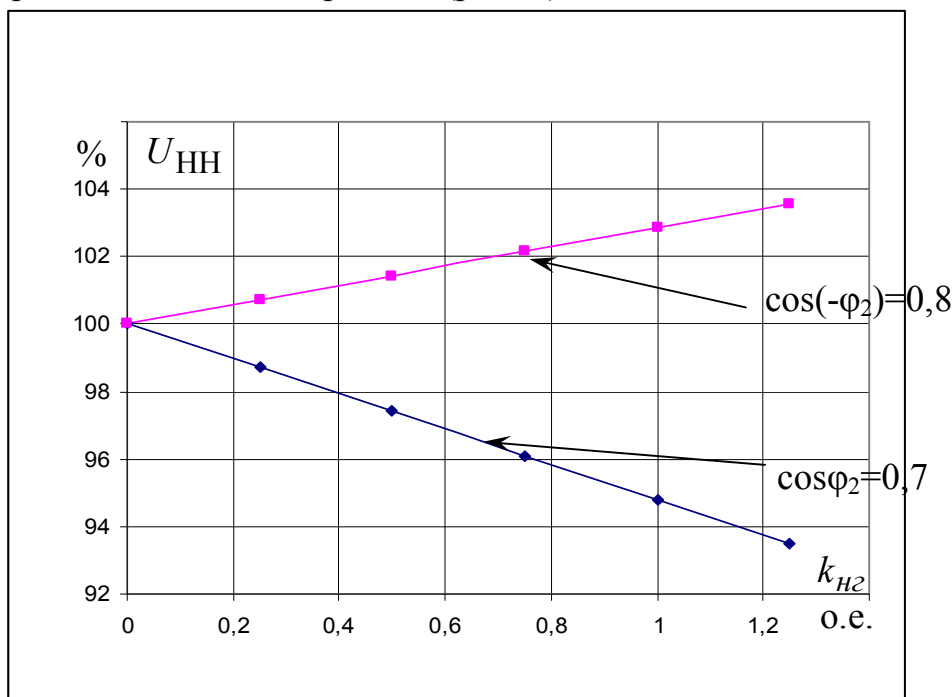


Рис. 7. Внешние характеристики трансформатора

ВЫВОД: изменение вторичного напряжения ΔU зависит от величины нагрузки и от характера этой нагрузки. Отрицательные значения ΔU при работе трансформатора с емкостной нагрузкой соответствуют повышению напряжения с увеличением коэффициента нагрузки. Наибольшее изменение вторичного напряжения $\Delta U = 5,187\%$ соответствует активно-индуктивной нагрузке при $\cos \varphi_2 = 0,7$ и коэффициенту нагрузки $k_{H2} = 1,0$, т.к. длительная перегрузка трансформатора недопустима.

6.2. Зависимости $\Delta U = f(\varphi_2)$

Зависимости отклонения напряжения на клеммах вторичной обмотки от характера симметричной нагрузки $\Delta U = f(\varphi_2)$ рассчитываем при питании трансформатора со стороны обмотки ВН номинальным напря-

жением номинальной частоты. Трансформатор работает при симметричной нагрузке неизменной величины. Расчет ведем для двух заданных значений коэффициента нагрузки $k_{н2} = 0,5; 1,0$.

При коэффициенте нагрузки трансформатора $k_{н2} = 0,5$:

- при угле $\varphi_2 = -30^\circ < 0$ $\cos \varphi_2 = 0,866$, $\sin \varphi_2 = -0,5$

$$\Delta U \approx k_{н2}(u_a \cos(-\varphi_2) + u_p \sin(-\varphi_2)) = 0,5 \cdot (1,083 \cdot 0,866 - 6,203 \cdot 0,5) = -1,082\%,$$

- при угле $\varphi_2 = 30^\circ > 0$ $\cos \varphi_2 = 0,866$, $\sin \varphi_2 = 0,5$

$$\Delta U \approx k_{н2}(u_a \cos(-\varphi_2) + u_p \sin(-\varphi_2)) = 0,5 \cdot (1,083 \cdot 0,866 + 6,203 \cdot 0,5) = 2,020\%.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов зависимостей $\Delta U = f(\varphi_2)$

$\Delta U = f(\varphi_2)$							
φ_2 , град	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
$k_{н2}=0,5$	-3,102	-2,856	-2,415	-1,810	-1,082	-0,280	0,542
$k_{н2}=1,0$	-6,203	-5,711	-4,830	-3,620	-2,164	-0,561	1,083

Окончание табл.2

$\Delta U = f(\varphi_2)$						
φ_2 , град	90	75	60	45	30	15
$k_{н2}=0,5$	3,102	3,136	2,957	2,576	2,020	1,326
$k_{н2}=1,0$	6,203	6,273	5,913	5,152	4,040	2,653

По результатам расчетов построим зависимости $\Delta U = f(\varphi_2)$ в одних осях координат (рис. 8).

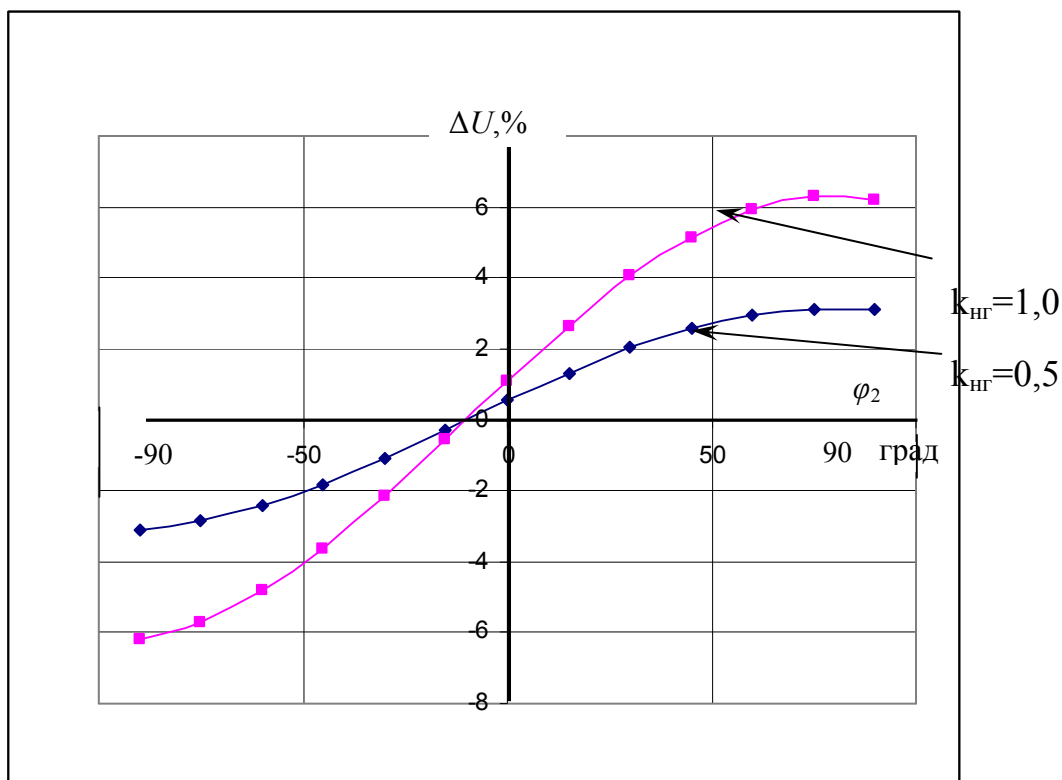


Рис. 8. Зависимости $\Delta U = f(\varphi_2)$

ВЫВОДЫ: При $\varphi_2 > 0$ зависимости $\Delta U = f(\varphi_2)$ соответствуют смешанной активно-индуктивной нагрузке, а при $\varphi_2 < 0$ – активно-емкостной. При активно-индуктивной нагрузке вторичное напряжение трансформатора падает, а в случае активно-емкостной нагрузки при $\varphi_2 < 0$ оно повышается.

6.3. Зависимости $\eta = f(k_{нг})$

Зависимости коэффициента полезного действия от величины симметричной нагрузки рассчитываем при питании трансформатора со стороны обмотки ВН номинальным напряжением номинальной частоты, при заданном коэффициенте мощности ($\cos \varphi_2 = 0,7 = const$) активно-индуктивного и активно-емкостного характера нагрузки.

Согласно заданному варианту при активно-индуктивной нагрузке $\cos \varphi_2 = 0,7$ и при активно-емкостной нагрузке $\cos(-\varphi_2) = 0,8$.

Трансформатор работает с максимальным коэффициентом полезного действия при коэффициенте нагрузки

$$k_{H2}(\eta_{\max}) = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{3,433}{17,330}} = 0,445, \text{ о.е.}$$

Коэффициент полезного действия определяем по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + k_{H2}^2 P_K}{k_{H2} S_H \cos \varphi_2 + P_0 + k_{H2}^2 P_K}$$

где P_0 – расчетное значение потерь холостого хода, кВт; P_K – расчетное значение потерь короткого замыкания, кВт.

Рассчитаем максимальное значение коэффициента полезного действия при $k_{H2} = 0,445$

- при активно-индуктивной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 0,7$)

$$\eta = 1 - \frac{3,433 + 0,445^2 \cdot 17,330}{0,445 \cdot 1600 \cdot 0,7 + 3,433 + 0,445^2 \cdot 17,330} = 1 - 0,0136 = 0,9864, \text{ о.е.};$$

- при активно-емкостной нагрузке ($\cos(-\varphi_2) = 0,8$)

$$\eta = 1 - \frac{3,433 + 0,445^2 \cdot 17,330}{0,445 \cdot 1600 \cdot 0,8 + 3,433 + 0,445^2 \cdot 17,330} = 1 - 0,0119 = 0,9881, \text{ о.е.}$$

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов зависимостей $\eta = f(k_{H2})$

Коэффициент нагрузки	k_{H2}	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	$k_{H2}(\eta_{\max})$
Активно-индуктивная нагрузка $\cos \varphi_2 = 0,7$	P_0 , кВт	3,43 3	3,43 3	3,43 3	3,43 3	3,433	3,433	3,433
	$k_{H2}^2 \cdot P_K$	0	1,08 3	4,33 3	9,74 8	17,33 0	27,07 8	3,432
	$k_{H2} S_H \cos \varphi_2$	0	280	560	840	1120	1400	498
	η , о.е.	0	0,98 4	0,98 6	0,98 4	0,982	0,979	0,9864
Активно-емкостная нагрузка $\cos(-\varphi_2) = 0,8$	P_0 , кВт	3,43 3	3,43 3	3,43 3	3,43 3	3,433	3,433	3,433
	$k_{H2}^2 \cdot P_K$	0	1,08 3	4,33 3	9,74 8	17,33	27,07 8	3,432
	$k_{H2} S_H \cos \varphi_2$	0	320	640	960	1280	1600	569
	η , о.е.	0	0,98 6	0,98 8	0,98 6	0,984	0,981	0,9881

По результатам расчетов построим зависимости $\eta = f(k_{H2})$ в одних осях координат (рис. 9).

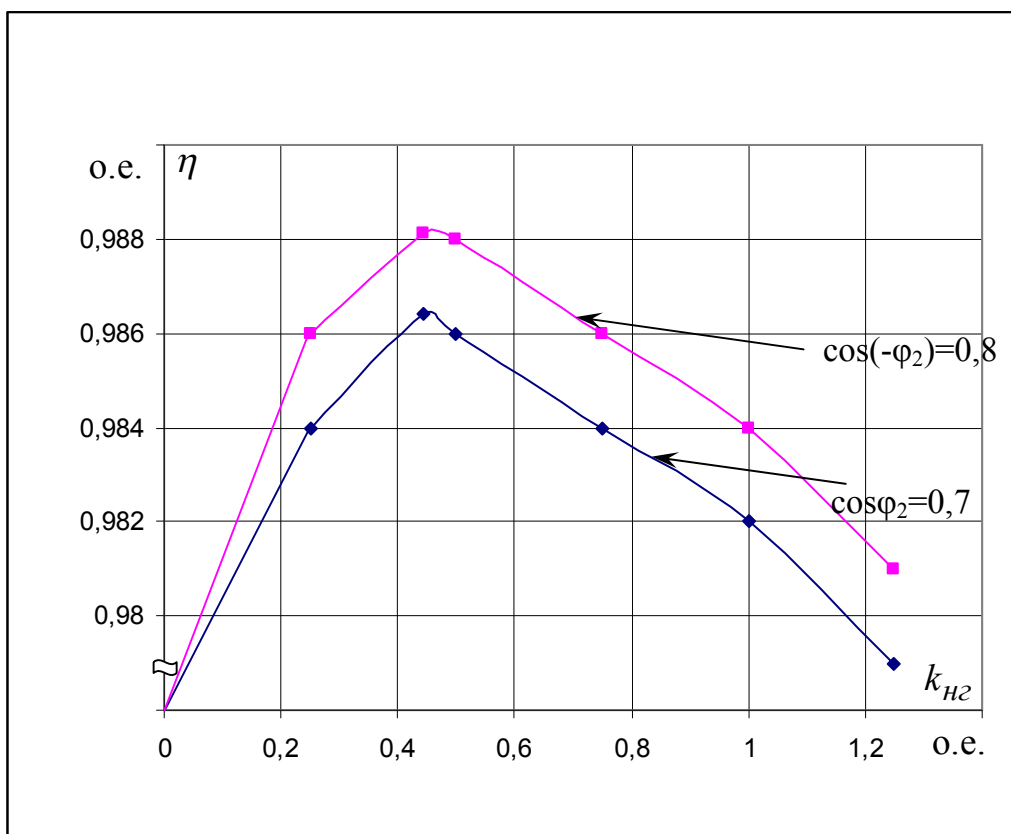


Рис. 9. Зависимости $\eta = f(k_{H2})$

ВЫВОД: Коэффициент полезного действия трансформатора зависит от величины и от характера нагрузки. Чем больше активная составляющая нагрузки, тем больше коэффициент полезного действия. Максимальное значение коэффициента полезного действия соответствует коэффициенту нагрузки $k_{H2} = 0,445$.

6.4. Параллельная работа двух трансформаторов одинаковой мощности при разных коэффициентах трансформации

Нагруженность уравнивающим током двух трансформаторов одинаковой мощности при параллельной работе оценим при заданном характере нагрузки ($\cos \varphi_2 = 0,7$) для двух случаев: когда один из трансформаторов включен на ответвление обмотки ВН, соответствующее номинальному коэффициенту трансформации, а другой поочередно на два из остальных четырех ответвлений: +2,5% и +5%.

Т.е. коэффициенты трансформации будут отличаться на +2,5% и +5%.

Коэффициент трансформации первого трансформатора равен отношению числа витков обмотки высокого напряжения к числу витков обмотки низкого напряжения $k_1 = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1289}{116} = 11,112$.

Тогда если $k_1 = k$, то $k_2 = 1,025k$ и $1,05k$.

Рассчитаем параметры схемы замещения короткого замыкания:

- полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{u_K U_{\phi BH}}{100 I_{BH}} = \frac{6,297 \cdot 20207}{100 \cdot 26,4} = 48,198, \text{ Ом};$$

- активное сопротивление короткого замыкания

$$r_K = \frac{P_K}{3 I_{BH}^2} = \frac{17833}{3 \cdot 26,4^2} = 8,529, \text{ Ом};$$

- индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{48,198^2 - 8,529^2} = 47,437, \text{ Ом}.$$

Фазовый угол уравнивающего тока относительно ΔU

$$\varphi_K = \arctg \frac{x_{K1} + x_{K2}}{r_{K1} + r_{K2}} = \arctg \frac{x_K}{r_K} = \arctg \frac{47,437}{8,529} = \arctg 5,562 = 79,81, \text{ град}.$$

Угол нагрузки $\varphi_2 = \arccos 0,7 = \arccos 0,7 = 45,57, \text{ град}.$

При параллельной работе двух трансформаторов одинаковой мощности, когда второй трансформатор включен на ответвление +2,5%, уравнивающий ток равен

$$I_y = \frac{U_{\phi BH} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{1,025k} \right)}{2Z_K} = \frac{0,025 U_{\phi BH}}{2,05kZ_K} = \frac{0,025 \cdot 20207}{2,05 \cdot 11,112 \cdot 48,198} = 0,46, \text{ А}.$$

При параллельной работе двух трансформаторов одинаковой мощности, когда второй трансформатор включен на ответвление +5,0%, уравнивающий ток равен

$$I_y = \frac{0,05 U_{\phi BH}}{2,1kZ_K} = \frac{0,05 \cdot 20207}{2,1 \cdot 11,112 \cdot 48,198} = 0,89, \text{ А}.$$

Уравнивающий ток дополнительно нагружает трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации

$$\begin{aligned} I_{\max 2,5\%} &= \sqrt{I_{BH}^2 + I_y^2 + 2 I_{BH} I_y \cos(\varphi_K - \varphi_2)} = \\ &= \sqrt{26,4^2 + 0,46^2 + 2 \cdot 26,4 \cdot 0,46 \cdot \cos(79,81 - 45,57)} = 26,782, \text{ А}, \end{aligned}$$

$$I_{\max 5\%} = \sqrt{I_{BH}^2 + I_y^2 + 2I_{BH}I_y \cos(\varphi_K - \varphi_2)} =$$

$$= \sqrt{26,4^2 + 0,89^2 + 2 \cdot 26,4 \cdot 0,89 \cdot \cos(79,81 - 45,57)} = 27,14, \text{ А},$$

а трансформатор с большим коэффициентом трансформации разгружает

$$I_{\min 2,5\%} = \sqrt{I_{BH}^2 + I_y^2 - 2I_{BH}I_y \cos(\varphi_K - \varphi_2)} =$$

$$= \sqrt{26,4^2 + 0,46^2 - 2 \cdot 26,4 \cdot 0,46 \cdot \cos(79,81 - 45,54)} = 26,02, \text{ А},$$

$$I_{\min 5\%} = \sqrt{I_{BH}^2 + I_y^2 - 2I_{BH}I_y \cos(\varphi_K - \varphi_2)} =$$

$$= \sqrt{26,4^2 + 0,89^2 - 2 \cdot 26,4 \cdot 0,89 \cdot \cos(79,81 - 45,57)} = 25,669, \text{ А}.$$

Определяем меру нагруженности трансформаторов при наличии уравнивающего тока по следующим выражениям:

$$\frac{I_{\max 2,5\%}}{I_{BH}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{BH}}\right)^2 + 2\frac{I_y}{I_{BH}} \cos(\varphi_K - \varphi_2)} =$$

$$= \sqrt{1 + \left(\frac{0,46}{26,4}\right)^2 + 2\frac{0,46}{26,4} \cos(79,81 - 45,57)} = 1,014, \text{ о.е.},$$

$$\frac{I_{\max 5\%}}{I_{BH}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{BH}}\right)^2 + 2\frac{I_y}{I_{BH}} \cos(\varphi_K - \varphi_2)} =$$

$$= \sqrt{1 + \left(\frac{0,89}{26,4}\right)^2 + 2\frac{0,89}{26,4} \cos(79,81 - 45,54)} = 1,028, \text{ о.е.},$$

$$\frac{I_{\min 2,5\%}}{I_{BH}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{BH}}\right)^2 - 2\frac{I_y}{I_{BH}} \cos(\varphi_K - \varphi_2)} =$$

$$= \sqrt{1 + \left(\frac{0,46}{26,4}\right)^2 - 2\frac{0,46}{26,4} \cos(79,81 - 45,54)} = 0,986, \text{ о.е.},$$

$$\frac{I_{\min 5\%}}{I_{BH}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{BH}}\right)^2 - 2\frac{I_y}{I_{BH}} \cos(\varphi_K - \varphi_2)} =$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{0,89}{26,4}\right)^2 - 2\frac{0,89}{26,4} \cos(79,81 - 45,54)} = 0,972, \text{ о.е.}$$

ВЫВОД: Степень нагруженности позволяет обосновать уменьшение нагрузки трансформатора на 0,014 о.е. при различии коэффициентов трансформации на 2,5% и на 0,028 о.е. при различии коэффициентов трансформации на 5%, для того, чтобы первый трансформатор работал в продолжительном режиме при номинальной нагрузке.

6.5. Параллельная работа двух трансформаторов разных мощностей

Допустимую нагрузку трансформатора при параллельной работе с другим трансформатором предельно допустимой большей мощности рассчитаем при заданном характере нагрузки ($\cos \varphi_2 = 0,7$).

ГОСТом допускается включать на параллельную работу трансформаторы, отличающиеся по номинальной мощности не более чем в 3 раза. Тогда номинальные мощности трансформаторов $S_{H1} = 1600$, кВА, $S_{H2} = 4000$, кВ·А; $u_{K2} = 7,5\%$ - табличное значение напряжения короткого замыкания трансформатора предельной мощности.

Если $u_{K1} \neq u_{K2}$, то при повышении нагрузки трансформатор с наименьшим напряжением короткого замыкания первым достигнет номинальной мощности.

Нагрузка каждого из параллельно работающих трансформаторов:

$$S_1 = \frac{\sum_{i=1} S_{Hi}}{\frac{u_{Ki}}{S_{Hi}} \sum_i \frac{S_{Hi}}{u_{Ki}}} = \frac{S_{H1} + S_{H2}}{\frac{u_{K1}}{S_{H1}} \left(\frac{S_{H1}}{u_{K1}} + \frac{S_{H2}}{u_{K2}} \right)} = \frac{1600 + 4000}{\frac{6,297}{1600} \left(\frac{1600}{6,297} + \frac{4000}{7,5} \right)} = 1778, \text{ кВА};$$

$$S_2 = \frac{\sum_{i=1} S_{Hi}}{\frac{u_{Ki}}{S_{Hi}} \sum_i \frac{S_{Hi}}{u_{Ki}}} = \frac{S_{H1} + S_{H2}}{\frac{u_{K2}}{S_{H2}} \left(\frac{S_{H1}}{u_{K1}} + \frac{S_{H2}}{u_{K2}} \right)} = \frac{1600 + 4000}{\frac{7,5}{4000} \left(\frac{1600}{6,297} + \frac{4000}{7,5} \right)} = 3749, \text{ кВА};$$

$$S_{1*} = \frac{S_i}{S_{Hi}} = \frac{\sum_i S_{Hi}}{u_{Ki} \sum_i \frac{S_{Hi}}{u_{Ki}}} = \frac{1778}{1600} = \frac{1600 + 4000}{6,297 \left(\frac{1600}{6,297} + \frac{4000}{7,5} \right)} = 1,11 = 1,129, \text{ о.е.};$$

$$S_{2*} = \frac{S_i}{S_{Hi}} = \frac{\sum_i S_{Hi}}{u_{Ki} \sum_i \frac{S_{Hi}}{u_{Ki}}} = \frac{3749}{4000} = \frac{1600 + 4000}{7,5 \left(\frac{1600}{6,297} + \frac{4000}{7,5} \right)} = 0,937 = 0,948, \text{ о.е.}$$

ВЫВОД: Наибольшее значение из S_{i*} позволяет обосновать уменьшение суммарной нагрузки трансформаторов на конкретную величину для исключения перегрузки самого нагруженного трансформатора и возможности его работы в продолжительном режиме при номинальной нагрузке.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Исходные данные к курсовому проекту

Таблица

П4.1

S_H кВА	U_2 кВ	U_1 кВ	P_0 кВт	P_K кВт	u_K %	i_0 %	№ варианта
1	2	3	4	5	6	7	8
25	6	0,23	0,125	0,6	4,5	3,2	1
	6	0,4	0,125	0,6	4,5	3,2	2
	6	0,4	0,125	0,69	4,7	3,2	3
	6,3	0,23	0,125	0,73	4,7	3,2	4
	10	0,23	0,125	0,6	4,5	3,2	5
	10	0,4	0,125	0,6	4,5	3,2	6
	10	0,4	0,125	0,69	4,7	3,2	7
	10,5	0,23	0,125	0,73	4,7	3,2	8
	6	0,23	0,170	0,6	4,5	5,15	9
	10	0,4	0,170	0,6	4,5	5,15	10
	1,65	0,4	0,155	0,66	4,5	5,0	11

40	6	0,23	0,18	0,88	4,5	3,0	12
	6	0,4	0,18	0,88	4,5	4,0	13
	6	0,4	0,18	1,00	4,7	3,0	14
	6	0,23	0,24	0,88	4,5	4,5	15
	6,3	0,23	0,18	1,05	4,7	3,0	16
	10	0,23	0,18	0,88	4,5	3,0	17
	10	0,4	0,18	0,88	4,5	3,0	18
	10	0,4	0,18	1,00	4,7	3,0	19
	10	0,4	0,24	0,88	4,5	4,5	20
	10,5	0,23	0,18	1,05	4,7	3,0	21
63	6	0,23	0,265	1,28	4,5	2,8	22
	6	0,4	0,265	1,28	4,5	2,8	23
	6	0,4	0,265	1,47	4,7	2,8	24
	6	0,4	0,36	1,28	4,5	4,5	25
	6,3	0,23	0,265	1,35	4,7	2,8	26
	10	0,23	0,265	1,28	4,5	2,8	27
	10	0,4	0,265	1,28	4,5	2,8	28
	10	0,4	0,265	1,47	4,7	2,8	29
	20	0,23	0,290	1,28	5,0	2,8	30
	20	0,4	0,290	1,28	5,3	2,8	31
	20	0,4	0,290	1,47	5,3	2,8	32
	10,5	0,23	0,360	1,28	4,5	4,5	33
	20	0,4	0,390	1,28	5,0	4,5	34
	10	0,23	0,240	1,28	4,5	2,8	35

Продолжение табл. П4.1

1	2	3	4	5	6	7	8
100	6	0,23	0,365	1,97	4,5	2,6	36
	6	0,4	0,365	1,97	4,5	2,6	37
	6	0,4	0,330	1,97	4,5	2,6	38
	6	0,4	0,330	2,27	4,7	2,6	39
	6	0,4	0,490	1,97	4,5	4,15	40
	6,3	0,23	0,330	2,05	4,7	2,6	41
	10	0,23	0,330	1,97	4,5	2,6	42
	10	0,4	0,330	1,97	4,5	2,6	43
	10	0,4	0,330	2,27	4,7	2,6	44
	10	0,23	0,490	1,97	4,5	4,15	45
	10,5	0,23	0,330	2,05	4,7	2,6	46
	20	0,23	0,465	1,97	4,5	2,6	47
	20	0,4	0,465	1,97	4,5	2,6	48
	20	0,4	0,465	2,27	5,0	2,6	49
	20	0,4	0,625	1,97	6,5	4,15	50
	35	0,23	0,465	1,97	6,5	2,6	51

	35	0,4	0,465	1,97	6,5	2,6	52
	35	0,4	0,465	2,27	6,8	2,6	53
160	3	0,4	0,510	2,65	4,5	2,4	54
	6	0,23	0,510	2,65	4,5	2,4	55
	6	0,4	0,510	2,65	4,5	2,4	56
	6	0,4	0,510	3,10	4,7	2,4	57
	6	0,69	0,510	2,65	4,5	2,4	58
	6	0,23	0,730	2,65	4,5	3,85	59
	6,3	0,4	0,510	2,78	4,7	2,4	60
	10	0,23	0,510	2,65	4,5	2,4	61
	10	0,4	0,510	2,65	4,5	2,4	62
	10	0,4	0,510	3,10	4,7	2,4	63
	10	0,69	0,510	2,65	4,5	2,4	64
	10,5	0,23	0,510	2,78	4,7	2,4	65
	6	0,69	0,730	2,65	4,5	3,85	66
	20	0,23	0,660	2,65	5,0	2,4	68
	20	0,4	0,660	2,65	5,0	2,4	68
	20	0,4	0,660	3,10	5,3	2,4	69
	20	0,69	0,660	2,65	5,0	2,4	70
	35	0,23	0,660	2,65	6,5	2,4	71
	35	0,4	0,660	2,65	6,5	2,4	72
	35	0,4	0,660	3,10	6,8	2,4	73
	35	0,69	0,660	2,78	6,5	2,4	74

Продолжение табл. П4.1

1	2	3	4	5	6	7	8
160	6	0,4	0,460	2,65	4,7	0,5	75*
	10	0,4	0,460	2,65	4,5	0,5	76*
250	3	0,4	0,740	3,70	4,5	2,4	77
	6	0,23	0,740	3,70	4,5	2,3	78
	6	0,4	0,740	3,70	4,5	2,3	79
	6	0,4	0,740	4,20	4,7	2,3	80
	6	0,69	0,740	3,70	4,5	2,3	81
	6,3	0,4	0,740	3,90	4,7	2,3	82
	10	0,23	0,740	3,70	4,5	2,3	83
	10	0,4	0,740	3,70	4,5	2,3	84
	10	0,4	0,740	4,20	4,7	2,3	85
	10	0,69	0,740	3,70	4,5	2,3	86
	10	0,23	1,05	3,812	4,6	3,7	87
	20	0,23	0,960	3,70	5,0	2,3	88
	20	0,4	0,960	3,70	5,0	2,3	89
	20	0,4	0,960	4,20	5,3	2,3	90
	20	0,69	0,960	3,70	5,0	2,3	91

	35	0,23	0,960	3,70	6,5	2,3	92
	35	0,4	0,960	3,70	6,5	2,3	93
	35	0,4	0,960	4,20	6,8	2,3	94
	35	0,69	0,960	3,70	6,5	2,3	95
	6	0,4	0,660	3,70	4,5	0,5	96*
	10	0,4	0,660	3,70	4,5	0,5	97*
400	3	0,4	0,950	5,50	4,5	2,1	98
	6	0,23	0,950	5,50	4,5	2,1	99
	6	0,4	0,950	5,50	4,5	2,1	100
	6	0,4	0,950	5,90	4,5	2,1	101
	6	0,69	0,950	5,50	4,5	2,1	102
	6	0,4	1,200	5,50	4,5	2,1	103
	6,3	0,4	0,950	5,80	4,7	2,1	104
	10	0,23	0,950	5,50	4,5	2,1	105
	10	0,4	0,950	5,50	4,5	2,1	106
	10	0,69	0,950	5,50	4,5	2,1	107
	10,5	0,23	0,950	5,80	4,7	2,1	108
	20	0,23	1,350	5,50	6,5	2,1	109
	20	0,4	1,350	5,50	6,5	2,1	110
	20	0,69	1,350	5,50	6,5	2,1	111
	20	3,0	1,350	5,50	6,5	2,1	112
	20	6,3	1,350	5,80	6,5	2,1	113

Продолжение табл. П4.1

1	2	3	4	5	6	7	8
400	35	0,23	1,350	5,50	6,5	2,1	114
	35	0,4	1,350	5,50	6,5	2,1	115
	35	0,69	1,350	5,50	6,5	2,1	116
	35	6,3	1,350	5,80	6,8	2,1	117
	35	11	1,350	5,80	6,8	2,1	118
	6	0,4	0,950	5,50	4,5	0,6	119*
	10	0,4	0,950	5,50	4,5	0,6	120*
630	3	0,4	1,560	7,6	5,5	2,0	121
	6	0,23	1,560	7,6	5,5	2,0	122
	6	0,4	1,560	7,6	5,5	2,0	123
	6	0,69	1,560	8,5	5,5	2,0	124
	6	3,15	1,560	8,5	5,5	2,0	125
	6,3	0,4	1,560	8,0	5,5	2,0	126
	10	0,23	1,560	7,6	5,5	2,0	127
	10	0,4	1,560	7,6	5,5	2,0	128
	10	0,69	1,560	8,5	5,5	2,0	129
	10	3,15	1,560	8,5	5,5	2,0	130
	20	0,4	1,900	7,6	6,5	2,0	131

	20	0,69	1,900	7,6	6,5	2,0	132
	20	6,3	1,900	7,6	6,5	2,0	133
	20	11	1,900	7,6	6,5	2,0	134
	35	0,4	1,900	7,6	6,5	2,0	135
	35	0,69	1,900	7,6	6,5	2,0	136
	35	3,15	1,900	7,6	6,5	2,0	137
	35	6,3	1,900	7,6	6,5	2,0	138
	35	11	1,900	7,6	6,5	2,0	139
	6	0,4	1,310	7,6	5,5	0,6	140*
	10	0,4	1,310	7,6	5,5	0,6	141*
1000	6	0,4	2,45	12,2	5,5	1,4	142
	6	0,525	2,45	12,2	5,5	1,4	143
	6	0,69	2,45	12,2	5,5	1,4	144
	6	3,15	2,45	12,2	5,5	1,4	145
	6,3	0,4	2,75	12,2	8,0	1,5	146
	10	0,4	2,45	12,2	5,5	1,4	147
	10,5	0,4	2,75	12,2	8,0	1,5	148
	10	0,525	2,45	12,2	5,5	1,4	149
	10	0,69	2,45	12,2	5,5	1,4	150
	10	3,15	2,45	12,2	5,5	1,4	151
	10	6,3	2,45	12,2	5,5	1,4	152

Продолжение табл. П4.1

1	2	3	4	5	6	7	8
1000	20	0,4	2,75	12,2	6,5	1,4	153
	20	0,69	2,75	12,2	6,5	1,4	154
	20	6,3	2,75	12,2	6,5	1,4	155
	20	10,5	2,75	11,6	6,5	1,4	156
	35	0,4	2,75	12,2	6,5	1,4	157
	35	0,69	2,75	12,2	6,5	1,4	158
	35	3,15	2,75	12,2	6,5	1,4	159
	35	6,3	2,75	12,2	6,5	1,4	160
1600	6	0,4	3,3	18,0	5,5	1,3	161
	6	0,69	3,3	18,0	5,5	1,3	162
	6	3,15	3,3	18,0	5,5	1,3	163
	10	0,4	3,3	18,0	5,5	1,3	164
	10	0,69	3,3	18,0	5,5	1,3	165
	10	3,15	3,3	18,0	5,5	1,3	166
	10	6,3	3,3	18,0	5,5	1,3	167
	20	0,4	3,65	18,0	6,5	1,4	168
	20	0,69	3,65	18,0	6,5	1,4	169
	20	6,3	3,65	18,0	6,5	1,4	170
	20	10,5	3,65	16,5	6,5	1,4	171

	35	0,4	3,65	18,0	6,5	1,4	172
	35	0,69	3,65	18,0	6,5	1,4	173
	35	3,15	3,65	18,0	6,5	1,4	174
	35	6,3	3,65	18,0	6,5	1,4	175
	35	10,5	3,65	18,0	6,5	1,4	176
2500	6	0,4	4,6	25,0	5,5	1,0	177
	6	0,69	4,6	25,0	5,5	1,0	178
	6	3,15	4,6	25,0	5,5	1,0	179
	10	0,4	4,6	25,0	5,5	1,0	180
	10	0,69	4,6	25,0	5,5	1,0	181
	10	3,15	4,6	25,0	5,5	1,0	182
	10	6,3	4,6	23,5	5,5	1,0	183
	20	0,69	5,1	25,0	6,5	1,1	184
	20	6,3	5,1	25,0	6,5	1,1	185
	20	10,5	5,1	23,5	6,5	1,1	186
	35	0,69	5,1	25,0	6,5	1,1	187
	35	3,15	5,1	25,0	6,5	1,1	188
	35	6,3	5,1	23,5	6,5	1,1	189
	35	10,5	5,1	23,5	6,5	1,1	190

Окончание табл. П4.1

1	2	3	4	5	6	7	8
4000	6	3,15	6,4	33,5	6,5	0,9	191
	10	3,15	6,4	33,5	6,5	0,9	192
	10	6,3	6,4	33,5	6,5	0,9	193
	20	6,3	6,7	33,5	7,5	1,0	194
	20	10,5	6,7	33,5	7,5	1,0	195
	35	3,15	6,7	33,5	7,5	1,0	196
	35	6,3	6,7	33,5	7,5	1,0	197
	35	10,5	6,7	33,5	7,5	1,0	198
6300	10	3,15	9,0	46,5	6,5	0,8	199
	10	6,3	9,0	46,5	6,5	0,8	200
	10,5	6,3	9,4	46,5	8,0	0,9	201
	20	6,3	9,0	46,5	6,5	0,8	202
	20	10,5	9,4	46,5	7,5	0,9	203
	35	3,15	9,4	46,5	7,5	0,9	204
	35	6,3	9,4	46,5	7,5	0,9	205
	35	10,5	9,4	46,5	7,5	0,9	206

Примечание. Вариант исходных данных курсового проектирования выдается только преподавателем. Это делается для исключения полного

совпадения параметров проектируемого силового трансформатора, создания условий максимальной самостоятельности. Жирным шрифтом выделены варианты примеров расчета в пособии и в [1].

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Правила оформления.....	3
1. Определение основных электрических величин.....	5
2. Расчет основных размеров трансформатора.....	6
3. Расчет обмоток НН и ВН	10
3.1. Расчет двухслойных и однослойных цилиндрических обмоток из прямоугольного провода	10
3.2. Расчет винтовой обмотки	17
3.3. Расчет цилиндрической многослойной обмотки из алюминиевой ленты	18
3.4. Расчет цилиндрической многослойной обмотки из круглого провода	19
3.5. Расчет непрерывной катушечной обмотки из прямоугольного провода	20
3.6. Расчет цилиндрической многослойной обмотки из прямоугольного провода	21
4. Определение параметров короткого замыкания	22

4.1. Определение потерь короткого замыкания	22
4.2. Определение напряжения короткого замыкания	24
5. Окончательный расчет магнитной системы. Определение параметров холостого хода	26
5.1. Определение размеров магнитной системы и массы стали.....	26
5.2. Определение потерь холостого хода.....	26
5.3. Определение тока холостого хода	28
6. Оценка эксплуатационных свойств трансформатора.....	28
6.1. Внешние характеристики.....	28
6.2. Зависимости $\Delta U = f(\varphi_2)$	29
6.3. Зависимости $\eta = f(k_{nz})$	30
6.4. Параллельная работа двух трансформаторов одинаковой мощности при разных коэффициентах трансформации.....	31
6.5. Параллельная работа двух трансформаторов разных мощностей.....	33
7. Контрольные вопросы	35
8. Перечень использованных источников	46
Приложение 1. Форма титульного листа пояснительной записки.....	47
Приложение 2. Форма бланка задания курсового проек- та.....	48
Приложение 3. Пример расчета активной части и оценки эксплуатационных свойств трансформато- ра.....	49
Приложение 4. Исходные данные к курсовому проекту.....	77

Учебное издание

ИГНАТОВИЧ Виктор Михайлович
УСАЧЕВА Татьяна Владимировна

РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЧАСТИ И ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Научный редактор
*доктор технических наук,
профессор О.П. Муравлев*

Дизайн обложки

Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии

с качеством предоставленного оригинал-макета

Подписано к печати 11. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 4,42.

Заказ . Тираж 150 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
на
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

