

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Кафедра электротехники и электрооборудования

Проектирование силовых трансформаторов

Методические указания для курсового проектирования

Новокузнецк
2015

УДК 621.314.2.001.24
П78

Рецензент
кандидат технических наук,
профессор кафедры АЭПиПЭ СибГИУ
А.И. Рыбаков

П78 Проектирование силовых трансформаторов: метод. указ. /
Сиб. гос. индустр. ун-т; сост.: В.П. Симаков, М.В. Кипервассер. –
Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. – 43 с. : ил.

Содержат исходные данные вариантов курсового проекта, требования к составу, содержанию и объему проекта, а также требования по выполнению расчетно-пояснительной записки. Изложена методика расчета силового трансформатора.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника профиля подготовки «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

Печатается по решению Совета Института информационных технологий и автоматизированных систем.

Содержание

	Введение	4
1	Структура и содержание курсового проекта	6
2	Исходные данные	7
3	Методические указания к выполнению курсового проекта	9
	3.1 Общая часть	9
	3.2 Определение основных электрических величин	9
	3.3 Расчет основных размеров трансформатора	9
	3.4 Расчет обмоток НН и ВН	9
	3.5 Определение характеристик короткого замыкания	9
	3.6 Окончательный расчет магнитной системы	9
	3.7 Тепловой расчет	10
	3.8 Графическая часть проекта	10
4	Общие требования и правила оформления	10
	Приложение	11
	Список литературы	40

Введение

Электрическая энергия для промышленных целей и электро-снабжения городов производится на крупных тепловых или гидро-электростанциях в виде трехфазной системы переменного тока частотой 50 Гц. Напряжения генераторов, установленных на электростанциях, стандартизованы и могут иметь значения 6600, 11 000, 13 800, 15 750, 18 000 или 20 000 в (ГОСТ 721-62). Для передачи электроэнергии на большие расстояния это напряжение необходимо повышать до 110, 220, 330 или 500 кВ в зависимости от расстояния и передаваемой мощности. Далее, на распределительных подстанциях напряжение требуется понижать до 6 или 10 кВ (в городах и промышленных объектах) или до 35 кВ (в сельских местностях и при большой протяженности распределительных сетей). Наконец, для ввода в заводские цеха и жилые квартиры напряжение сетей должно быть понижено до 380, 220 или 127 в.

Передача электрической энергии от места ее производства до места потребления требует в современных сетях многократной трансформации в повышающих и понижающих трансформаторах. Но принципиально каждый трансформатор может быть использован либо как повышающий, либо как понижающий в зависимости от его назначения, т. е. он является обратимым аппаратом.

Силовой трансформатор является одним из важнейших элементов электрической сети (рисунок 1). Назначение силовых трансформаторов - преобразование электрической энергии в электрических сетях и установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии.



а



б

Рисунок 1- Силовые трансформаторы: масляные (а), сухие (б)

Силовые трансформаторы обладают высоким коэффициентом полезного действия (к. п. д.), значение которого составляет от 95 до 99,5%, в зависимости от мощности. Трансформатор большей мощности имеет соответственно и более высокий к. п. д.

Силовые трансформаторы подразделяются на два вида:

- **трансформаторы общего назначения** - предназначены для включения в сеть, не отличающуюся особыми условиями работы, или для питания приемников электрической энергии, не отличающихся особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы;

- **трансформаторы специального назначения** - предназначены для непосредственного питания потребительской сети или приемников электрической энергии, если эта сеть или приемники отличаются особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы. К числу таких сетей или приемников относятся выпрямительные установки, электрические печи и др. [1].

Классификация трансформаторов производится по различным признакам: по габаритам, назначению (рисунок 2) и т.д. В настоящее время по назначению обычно выделяют трансформаторы силовые, измерительные и специального назначения. Измерительные трансформаторы включают в себя: трансформаторы тока и трансформаторы напряжения.

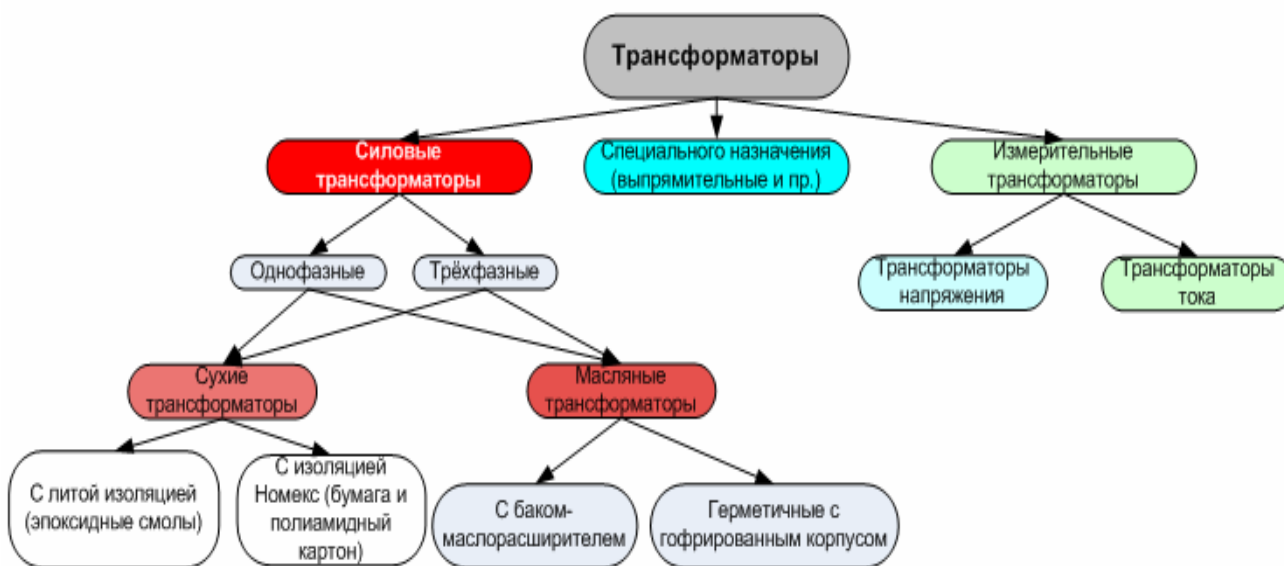


Рисунок 2-Краткая классификация трансформаторов по назначению

Трансформатор состоит из магнитопровода и насаженных на него обмоток. Кроме того, трансформатор состоит из целого ряда чисто конструктивных узлов и элементов, представляющих собой конструктивную его часть. Элементы конструкции служат главным образом для удобства применения и эксплуатации трансформатора. К ним относятся изоляционные конструкции, предназначенные для обеспечения изоляции токоведущих частей, отводы и вводы - для присоединения обмоток к линии электропередачи, переключатели - для регулирования напряжения трансформатора, баки - для заполнения их трансформаторным маслом, трубы и радиаторы - для охлаждения трансформатора и др.

Магнитопровод и обмотки вместе с крепежными деталями образуют активную часть силового трансформатора.

Трансформатор во время своей работы вследствие возникающих в нем потерь нагревается. Чтобы температура нагрева трансформатора (в основном его изоляции) не превышала допустимого значения, необходимо обеспечить достаточное охлаждение обмоток и магнитопровода. Для этого в большинстве случаев трансформатор (активную часть) помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом. При нагревании масло начинает циркулировать и отдает тепло стенкам бака, а от последних тепло рассеивается в окружающем воздухе.

Курсовой проект выполняется в соответствии со стандартами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и стандартами предприятия (СибГИУ).

Цель работы: приобретение практических навыков разработки проекта трансформатора.

Задачи работы: углубление полученных знаний по дисциплине «Электрооборудование промышленности»: назначение, устройство, принцип действия, режимы работы и экономичность силовых трансформаторов; привить навыки электрического расчета электротехнологических установок.

1 Структура и содержание курсового проекта

В исходных данных для каждого варианта курсового проекта задана мощность трансформатора, первичное и вторичное напряжения и основные характеристики.

Курсовой проект включает следующие основные части:

1 общая часть (введение);

2 определение основных электрических величин;

- 3 расчет основных размеров трансформатора;
- 4 расчет обмоток НН и ВН;
- 5 определение характеристик короткого замыкания;
- 6 расчет магнитной системы;
- 7 тепловой расчет;

Пояснительная записка должна иметь рисунки по ходу расчета:

- основные размеры трансформатора;
- схема транспозиций параллельных проводов;
- сечение витка обмотки НН;
- расположение катушки ВН и размеры радиальных каналов;
- основные размеры обмоток;
- схема регулирования напряжения;
- определение добавочных потерь в обмотках;
- определение механических напряжений в обмотках;
- сечение стержней и ярма;
- основные размеры магнитной системы;
- размеры бака;
- элементы радиатора.

Графическая часть проекта состоит из одного листа формата А1.

2 Исходные данные

Номер варианта курсового проекта выдается преподавателем.

Исходные данные вариантов заданий приведены в таблице 1.

Общие условия для всех вариантов расчета:

Число фаз $m = 3$.

Частота $f = 50$ Гц.

Нагрузка длительная.

Установка наружная.

Схема соединения – $Y/Y - 0$.

В таблице приведены следующие обозначения:

S – общая мощность, $\text{kB} \cdot \text{A}$;

U_1 – номинальное высшее напряжение, kB ;

U_2 – номинальное низшее напряжение, kB ;

U_k – напряжение короткого замыкания, %;

P_k – потери короткого замыкания, kBt ;

P_0 – потери холостого хода, kBt ;

i_0 – ток холостого хода, %;

M – охлаждение естественное, масляное.

Таблица 1 – Исходные параметры для расчета трансформатора

№ вар- та	Тип трансформатора	S, кВт·А	U ₁ , кВт	U ₂ , кВт;	Пределы регули- рования напря- жения, %	U _к , %	P _к , кВт	P ₀ , кВт	i ₀ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ТМ – 7500/35	7500	38,5	11,0	+2 × 2,5	7,5	75,0	24,0	3,5
2	ТМ – 560/10	560	10,0	0,525	±1 × 5	5,5	9,4	2,5	6,0
3	ТМ – 6300/35	6300	20,0	11,0	+2 × 2,5	7,5	46,5	8,0	0,9
4	ТМ – 400/35	400	35,0	0,69	±1 × 5	6,5	5,9	1,3	2,1
5	ТМ – 5600/10	5600	10,0	6,3	±4 × 1,25	5,5	56,0	18,0	4,0
6	ТМ – 400/10	400	10,0	0,23	±2 × 2,5	4,5	5,5	1,0	2,1
7	ТМ – 4000/35	4000	35,0	10,5	±4 × 2,5	7,5	34,7	5,7	1,3
8	ТМ – 250/35	250	35,0	0,4	±2 × 2,5	6,5	3,9	0,96	2,3
9	ТМ – 2500/10	2500	10,0	0,69	±4 × 2,5	5,5	25,0	3,9	1,0
10	ТМ – 160/35	160	35,0	0,4	±2 × 2,5	6,5	2,7	0,6	2,6
11	ТМ – 1800/10	1800	10,0	6,3	±2 × 2,5	5,5	24,0	8,0	4,5
12	ТМ – 100/35	100	20,0	0,4	±2 × 2,5	6,5	2,0	0,4	4,16
13	ТМ – 1600/35	1600	35,0	10,5	±1 × 5	6,5	18,0	3,1	1,4
14	ТМ – 100/6	100	6,3	0,525	±2 × 2,5	5,5	2,6	0,6	6,5
15	ТМ – 1600/10	1600	10,0	0,4	±1 × 4,0	5,5	18,0	2,8	1,3
16	ТМ – 63/10	63	10,0	0,4	±2 × 2,5	4,5	1,4	0,22	2,8
17	ТМ – 1000/35	1000	35,0	0,4	±1 × 5,0	6,5	10,6	2,4	1,4
18	ТМ – 50/10	50	10,0	0,4	±2 × 2,5	5,5	1,3	0,44	8,0
19	ТМ – 1000/35	1000	20,0	0,4	±2 × 2,5	6,5	12,2	2,4	1,5
20	ТМ – 40/10	40	10,0	0,4	±2 × 2,5	4,5	1,0	0,2	3,0
21	ТМ – 750/10	750	10,0	0,525	±1 × 3,0	5,5	11,9	4,1	6,0
22	ТМ – 30/10	30	10,0	0,4	±3 × 2,0	5,5	0,85	0,3	9,0
23	ТМ – 630/35	630	35,0	11,0	±3 × 2,5	6,5	7,6	2,0	2,0
24	ТМ – 25/6	25	6,3	0,23	±2 × 2,5	4,5	0,6	0,1	3,2
25	ТМ – 560/35	560	35,0	0,4	±2 × 2,5	6,5	10,5	6,0	6,5

3 Методические указания к выполнению курсового проекта

3.1 Общая часть (введение)

В общей части проекта необходимо в общих чертах пояснить назначение трансформатора, принцип действия и устройство. [1, 2, 3].

3.2 Определение основных электрических величин [1 гл. 3, 4]:

- а) определение линейных и фазных токов и напряжений обмоток ВН и НН;
- б) определение испытательных напряжений обмоток;
- в) определение активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания.

3.3 Расчет основных размеров трансформатора [1, гл. 2, 3, 4]; [2, гл. 6]:

- а) выбор схемы и конструкции магнитопровода;
- б) выбор марки и толщины листов стали и типа между листовой изоляции. Выбор индукции в магнитопроводе;
- в) выбор материала обмоток [5, разд. 25, 26]. г) Выбор конструкции и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток;
- д) предварительный расчет трансформатора и выбор соотношения основных размеров β с учетом заданных значений U_k , P_k , P_0 .
- е) определение диаметра стержня и высоты обмотки. Предварительный расчет магнитопровода.

3.4 Расчет обмоток НН и ВН [1 гл. 5, 6]; [2, гл. 7]:

- а) выбор типа обмоток НН и ВН;
- б) расчет обмотки НН;
- в) расчет обмотки ВН.

3.5 Определение характеристик короткого замыкания [1, гл. 7]; [2, гл. 8]:

- а) определение потерь короткого замыкания;
- б) определение напряжения короткого замыкания;
- в) определение механических сил в обмотках.

3.6 Окончательный расчет магнитной системы. Определение характеристик холостого хода [1 гл. 8]; [2, гл. 9]:

- а) определение размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма;
- б) определение массы стержней и ярм и массы стали;
- в) определение потерь холостого хода;
- г) определение тока холостого хода.

3.7 Тепловой расчет и расчет охлаждающей системы [1 гл. 9]; [2, гл. 10]:

- а) поверочный тепловой расчет обмоток;
- б) расчет охлаждающей системы (бака и охладителей);
- в) определение превышения температуры обмоток и масла над воздухом;
- г) определение массы масла и основных размеров расширителя.

3.8 Графическая часть проекта [1,2].

На листе необходимо изобразить общий вид трансформатора со всем дополнительным оборудованием: расширительный бак, маслоуказатель, выхлопная труба, отверстие для слива масла, реле для защиты трансформатора от аварийных ситуаций и другое.

Необходимо выполнить разрез как бака в целом, так и обмоток ВН и НН.

4 Общие требования и правила оформления

Расчетно-пояснительная записка должна содержать:

- титульный лист;
- оглавление;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список литературы.

Расчетно-пояснительная записка и графическая часть курсового проекта должны быть оформлены в соответствии с требованиями [6].

Пример оформления расчетно-пояснительной записки изложен в приложении (страница 11).

Ссылки в тексте (на применяемые разделы, формулы, рисунки, таблицы без подтверждения первоисточника), соответствуют источнику [1], при указании на выше перечисленные параметры в тексте методических указаний, рядом со ссылкой установлено (м) – “методичка”.

Задание для расчета трансформатора:

мощность трансформатора	1600 кВА
напряжение холостого хода	35000±5 % / 0,69 кВ
схема соединения обмоток	звезда/звезда
частота	50 Гц
потери холостого хода	3100 Вт
потери короткого замыкания	18000 Вт
ток холостого хода	1,3 %
напряжение короткого замыкания	6,5 %

Введение

Силовой трансформатор - это электрический аппарат, который предназначен для преобразования электрической энергии одного значения напряжения в электрическую энергию другого значения напряжения. Трансформаторы бывают:

- в зависимости от количества фаз: однофазные и трехфазные;
- по количеству обмоток: двухобмоточные и трехобмоточные;
- наружной и внутренней установки;
- по назначению: понижающие и повышающие.

Кроме того, силовые трансформаторы различают по группам соединения обмоток, по способу охлаждения. Также при установке трансформаторов учитывают климатические условия.

Принцип работы любого силового трансформатора основан на законе электромагнитной индукции. Если к обмотке данного устройства подключить источник переменного тока, то по виткам этой обмотки будет протекать переменный ток, который создаст в магнитопроводе трансформатора переменный магнитный поток. Замкнувшись в магнитопроводе, переменный магнитный поток будет индуцировать электродвижущую силу (ЭДС) в другой обмотке трансформатора. Это объясняется тем, что все обмотки трансформатора намотаны на один магнитопровод, то есть они связаны между собой магнитной связью. Значение индуцируемой ЭДС будет пропорционально количеству витков данной обмотки.

Конструкции силовых трансформаторов различного типа схожи между собой. Отличие заключается в комплектации аппарата, конструкции системы охлаждения и защиты.

1 Предварительный расчет трансформатора

1.1 Расчет основных электрических величин и изоляционных расстояний

Расчет проводим для трехфазного трансформатора стержневого типа с concentрическими обмотками.

Мощность одной фазы и одного стержня:

$$S_{\Phi} = S' = \frac{S}{3} = \frac{1600}{3} = 533,3 \text{ кВА}$$

Номинальные (линейные) токи на сторонах:

$$\text{НН: } I_1 = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690} = 1339 \text{ А}$$

$$\text{ВН: } I_2 = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35000} = 26.4 \text{ А}$$

Фазные ток обмоток НН (схема соединения - звезда) равны линейным токам.

Фазные ток обмоток ВН (схема соединения - звезда) равны линейным токам.

Фазные напряжения обмоток НН (схема соединения - звезда) равны:

$$\text{НН: } U_{\Phi 1} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 399 \text{ В}$$

Фазные напряжения обмоток ВН (схема соединения - звезда) равны:

$$\text{ВН: } U_{\Phi 2} = \frac{35000}{\sqrt{3}} = 20207 \text{ В}$$

Испытательные напряжения обмоток (таблица 4.1): для обмотки ВН $U_{\text{исп}}=85 \text{ кВ}$; для обмотки НН $U_{\text{исп}}=5 \text{ кВ}$.

По таблице 5.8 выбираем тип обмоток:

- обмотка НН (напряжение 0,398 кВ) при токе 1339 А винтовая из прямоугольного медного провода;

- обмотка ВН (напряжение 20,207 кВ) при токе 26,4 А непрерывная катушечная из прямоугольного медного провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН $U_{исп}=85$ кВ по таблице 4.5 находим изоляционные расстояния (рисунок 3.5): $a'_{12}=27$ мм; $l'_{02}=75$ мм; $a'_{22}=30$ мм; для $U_{исп}=5$ кВ (таблица 4.4) находим $a'_{01}=15$ мм.

1.2 Определение исходных данных расчета.

Приведенная ширина двух обмоток $\frac{a_1 + a_2}{3}$ определяется по формуле (3.28):

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = k \cdot \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2} = 0.51 \cdot \sqrt[4]{533,3} \cdot 10^{-2} = 0,0245 \text{ м}$$

где $k=0,51$ (таблица 3.3)

Приведенный канал рассеяния:

$$a_p = a'_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 0,027 + 0,0245 = 0,0515 \text{ м}$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_a = \frac{P_K}{10 \cdot S} = \frac{18000}{10 \cdot 1600} = 1,125 \%$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_p = \sqrt{u_K^2 - u_a^2} = \sqrt{6,5^2 - 1,125^2} = 6,402 \%$$

Согласно указаниям раздела 2.3 выбираем трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему по (рисунок 2.5д) с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне (рисунок 2.17б). Прессовка стержней бандажами из стеклоленты (рисунок 2.18б), ярм - стальными балками (рисунок 2.21а). Материал магнитной системы - рулонная сталь марки 3404 толщиной 0,35 мм.

1.3 Определение основных размеров трансформатора

Диаметр стержня определяем по (3.17):

$$d = 0.507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot \beta \cdot a_P \cdot k_P}{f \cdot u_P \cdot B_C^2 \cdot k_C^2}} = 0.507 \cdot \sqrt[4]{\frac{533,3 \cdot 1,8 \cdot 0,045 \cdot 0,95}{50 \cdot 6,402 \cdot 1,57^2 \cdot 0,8972^2}} = 0,256 \text{ м}$$

где $\beta = 1,8$ (таблица 3.12);

$k_P \approx 0,95$ - коэффициент Роговского, принятый коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю (раздел 3.7);

$B_C = 1,57$ Тл - индукция в стержне (таблица 2.4);

$k_C = k_{KP} \cdot k_3 = 0.928 \cdot 0.97 = 0.9$ согласно (3.67);

где: $k_{KP} = 0,928$ (таблица 2.5), $k_3 = 0,97$ (таблица 2.2).

Выбираем ближайший нормализованный диаметр (с. 87):

$d_H = 0,26$ м.

Определяем значение β_H согласно выбранного диаметра (3.69):

$$\beta_H = \beta \cdot \left(\frac{d_H}{d} \right)^4 = 1,8 \cdot \left(\frac{0,26}{0,256} \right)^4 = 1,915$$

Радиальный размер обмотки НН предварительно по (3.71):

$$a_1 = k_1 \cdot \frac{a_1 + a_2}{3} = 1,4 \cdot 0,025 = 0,035 \text{ м}$$

где $k_1 = 1,4$ (раздел 3.7).

Средний диаметр канала между обмотками предварительно определяем по формуле (3.33):

$$d_{12} = a \cdot d_H = 1,4 \cdot 0,26 = 0,364 \text{ м}$$

где $a = 1,4$ (таблица 3.4)

Высота обмотки l определяем по (3.72):

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta} = \frac{\pi \cdot 0,364}{1,8} = 0,635 \text{ м}$$

Активное сечение стержня, т.е. чистое сечение стали по (3.73):

$$P_C = k_3 \cdot P_{\Phi.C} = k_3 \cdot k_{KP} \frac{\pi \cdot d_H^2}{4} = 0,97 \cdot 0,928 \frac{\pi \cdot 0,26^2}{4} = 0,0477 \text{ м}^2$$

Электродвижущая сила одного витка (3.74):

$$u_B = 4,44 f B_C P_C = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,57 \cdot 0,0477 = 16,63 \text{ В}$$

2 Расчет обмоток НН и ВН

2.1 Расчет обмотки НН

Число витков обмотки НН:

$$w_1 = \frac{U_{\Phi 1}}{U_B} = \frac{399}{16,63} = 23,99, \text{ принимаем } w_1 = 24 \text{ витка}$$

Напряжение одного витка u_B :

$$u_B = \frac{399}{24} = 16,63 \text{ В}$$

Средняя плотность тока в обмотках по (5.4):

$$J_{CP} = 0,746 \cdot k_D \frac{P_K \cdot u_B}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4 = 0,746 \cdot 0,91 \cdot \frac{18000 \cdot 16,63}{1600 \cdot 0,364} \cdot 10^4 =$$
$$= 3,48 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} = 3,48 \frac{\text{МА}}{\text{м}^2}$$

где $k_D = 0,91$ (таблица 3.6).

Сечение витка ориентировочно определяем по (6.6):

$$\Pi_1' = \frac{I_1}{J_{CP}} = \frac{1339}{3,48 \cdot 10^6} = 384,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 384,8 \text{ мм}^2$$

По таблице 5.8, учитывая значения мощности $1600 \text{ кВт} \cdot \text{А}$, тока на один стержень 1339 А , номинального напряжения обмотки 690 В и сечения витка $384,8 \text{ мм}^2$, выбираем конструкцию винтовой обмотки из прямоугольного провода. Размер радиального канала предварительно $h_K = 5 \text{ мм}$, согласно рекомендациям раздел 6.1. Число реек по окружности обмотки 12, ширина междувитковых прокладок $b_{ПР} = 40 \text{ мм}$, (раздел 5.2).

Ориентировочный осевой размер витка (6.18):

$$h_{B1} = \frac{l}{w_1 + 4} - h_K = \frac{0,635}{24 + 4} - 0,005 = 0,0177 \text{ м} = 17,7 \text{ мм}$$

Исходя из ограничения для масляных трансформаторов $q = 2000 \text{ Вт/мм}^2$ и полученного значения $h_{B1} = 17,7 \text{ мм}$, плотность тока $J = 3,5 \text{ МА/м}^2$ задает максимальный размер медного провода $b_{\max} = 15 \text{ мм}$ (график 5.34а). Для предварительно рассчитанных параметров и рекомендаций раздела 5.7, выбираем двухходовую винтовую обмотку с радиальными каналами в витках и между витками с равномерно распределенной транспозицией (рисунок 2.1(м)).

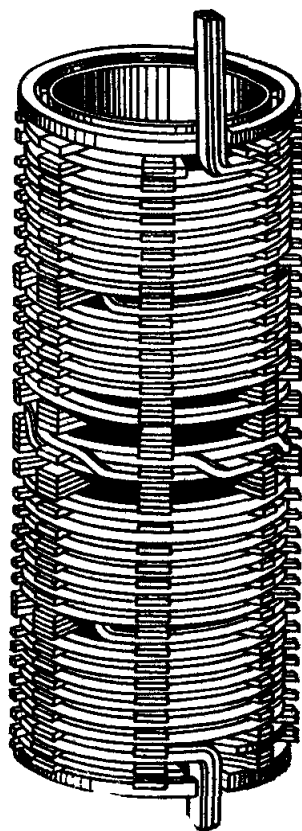


Рисунок 2.1 - Обмотка НН (винтовая).

По полученным ориентировочным значениям Π'_B и h_{B1} в таблице 5.2 подбираем сечение витка из 12 параллельных проводов:

$\text{ПБ} 12 \times \frac{4,5 \times 7,5}{5 \times 8}$, разделенных на две группы по 6 проводов с ка-

налами по 5 мм между группами витка и между витками (рисунок 2.2(м)).

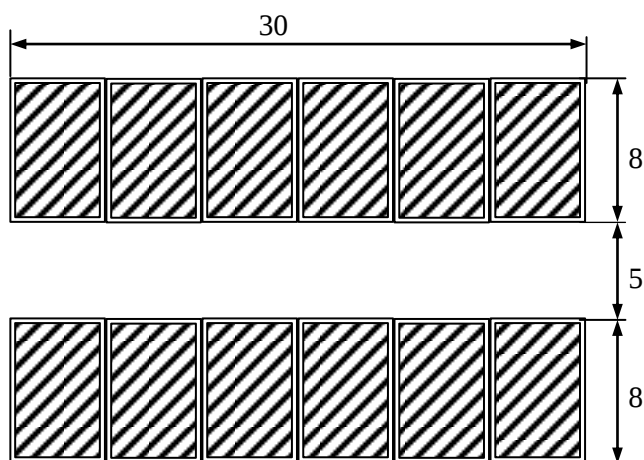


Рисунок 2.2 - Сечение витка винтовой обмотки НН
Масштаб 2,5:1.

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

Полное сечение витка:

$$\Pi_1 = 12 \cdot 32,9 = 394,7 \text{ мм}^2 = 394,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Плотность тока:

$$J_1 = \frac{I_1}{\Pi_1} = \frac{1339}{394,7 \cdot 10^{-6}} = 3,39 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} = 3,39 \frac{\text{МА}}{\text{м}^2}$$

По графику (рисунок 5.34а) находим для $J=3.39 \text{ МА/м}^2$ и $b=7,5 \text{ мм}$ значение $q=900 \text{ Вт/м}^2$.

Осевой размер (высота) для двухходовой обмотки с равномерно распределенной транспозицией (6.23), с учетом толщины изоляции и шести радиальных каналов по 10 мм:

$$l_1 = 2b' \cdot 10^{-3}(w_1 + 1) + kh_k(2w_1 + 1) \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot (24 + 1) + 0,95 \cdot [(24 \cdot 2 + 1 - 6) \cdot 5 + 6 \cdot 10] \cdot 10^{-3} = 0,661 \text{ м} \approx 0,66 \text{ м}$$

$k=0.95$, согласно раздела 6.1.

Радиальный размер обмотки:

$$a_1 = 6 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,030 \text{ м}$$

По таблице 4.4 для $U_{\text{исп}}=5 \text{ кВ}$, $S=1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ и винтовой обмотки находим $a_{01} = 15 \text{ мм}$. Обмотка наматывается на 12 рейках на бумажно-бакелитовом цилиндре размерами:

$$\varnothing \frac{0,27}{0,278} \times 0,77 \text{ м}$$

Внутренний диаметр обмотки:

$$D_1' = d_H + 2 \cdot a_{01} = 0,26 + 2 \cdot 0,015 = 0,29 \text{ м}$$

Внешний диаметр обмотки:

$$D_1'' = D_1' + 2 \cdot a_1 = 0,29 + 2 \cdot 0,030 = 0,35 \text{ м}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки НН (7.19):

$$q_1 = \frac{107 \cdot J_1 \cdot I \cdot w_K \cdot k_D}{k_3(b' + a_1)} \cdot 10^{-10} = \frac{107 \cdot 3,39 \cdot 10^6 \cdot 1339 \cdot 0,5 \cdot 1,05}{0,75 \cdot (0,008 + 0,030)} \cdot 10^{-10} = 894 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

где: b' –размер провода с изоляцией; предварительно принимаем $k_d=1,05$.

Масса металла обмотки (7.6):

$$G'_{O1} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{CP} \cdot w_1 \cdot \Pi_1 = 28 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 0,32 \cdot 24 \cdot 394,7 \cdot 10^{-6} = 254,6 \text{ кг}$$

где: $D_{CP} = \frac{D_1' + D_1''}{2}$

Уточненную массу провода определяем по таблице 5.5:

$$G_{IP1} = 1,02 \cdot G'_{O1} = 1,02 \cdot 254,6 = 259,7 \text{ кг}$$

2.2 Расчет обмотки ВН

Выбираем схему регулирования рисунок 2.3(м) с выводом концов всех трех фаз обмотки к одному трехфазному переключателю (разделы 6.2, 6.3). Контакты переключателя рассчитываются на рабочий ток 26,4 А. Наибольшее напряжение между контактами переключателя в одной фазе, согласно раздела 6.2: %

- рабочее: $\frac{10}{\sqrt{3}} \% U_2 = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 100} \cdot U_2 = \frac{10 \cdot 35000}{\sqrt{3} \cdot 100} = 2021 \text{ В};$

- испытательное: $2 \cdot \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 100} \cdot U_2 = \frac{2 \cdot 10 \cdot 35000}{\sqrt{3} \cdot 100} = 4042 \text{ В}$

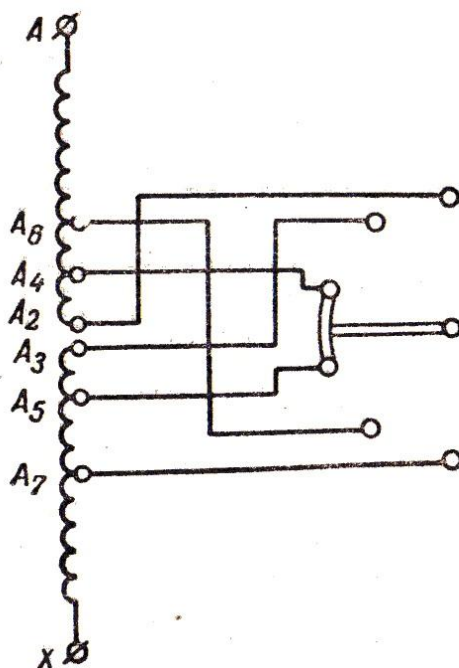


Рисунок 2.3 - Схема выполнения ответвлений в обмотке ВН.

Для получения на стороне ВН различных напряжений необходимо соединить выводы, согласно таблицы 2.1(м).

Таблица 2.1-Схема соединения ответвлений обмотки ВН

Напряжение, В	Ответвления обмотки
36750	A ₂ A ₃ B ₂ B ₃ C ₂ C ₃
35875	A ₃ A ₄ B ₃ B ₄ C ₃ C ₄
35000	A ₄ A ₅ B ₄ B ₅ C ₄ C ₅
34125	A ₅ A ₆ B ₅ B ₆ C ₅ C ₆
33250	A ₆ A ₇ B ₆ B ₇ C ₆ C ₇

Число витков в обмотке ВН при номинальном напряжении определяем (6.27):

$$w_{H2} = w_1 \frac{U_{\Phi 2}}{U_{\Phi 1}} = 24 \cdot \frac{20207}{399} = 1215 \text{ витков}$$

Число витков на одной ступени регулирования (6.28):

$$w_p = \frac{\Delta U}{\sqrt{3} \cdot u_B} = \frac{875}{\sqrt{3} \cdot 16.63} = \frac{505}{\sqrt{3} \cdot 16.63} = 31 \text{ витков}$$

Для пяти ступеней число витков на ответвлениях для обмотки ВН определяется (таблица 2.2(м)):

Таблица 2.2- Расчет числа витков на ответвлениях для обмотки ВН

Напряжение, В	Число витков на ответвлениях
36750	1215+2 31=1277
35875	1215+31=1246
35000	1215
34125	1215-31=1184
33250	1215-2 31=1153

Ориентировочная плотность тока (6.33):

$$J_2 = 2 \cdot J_{CP} - J_1 = 2 \cdot 3,48 \cdot 10^6 - 3,39 \cdot 10^6 = 3,57 \frac{\text{МА}}{\text{м}^2}$$

Ориентировочное сечение витка (6.34):

$$\Pi'_2 = \frac{26,4}{3,57 \cdot 10^6} = 7,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 7,39 \text{ мм}^2$$

По таблице 5.8, с учетом $S=1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $I_2=26,4 \text{ А}$; $U_2=35000 \text{ В}$; $\Pi'_2=7,39 \text{ мм}^2$, выбираем непрерывную катушечную обмотку из медного прямоугольного провода. По сортаменту медного обмоточного провода выбираем провод марки ПБ (таблица 5.2):

$$\Pi Б - 1 \times \frac{1,4 \times 5,6}{1,9 \times 6,1} \text{ сечением } \Pi_2 = 7,625 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

В двух верхних и двух нижних катушках обмотки каждой фазы применяем провод того же размера с усиленной изоляцией 1,35 (1,5) мм, с размерами провода в изоляции 2,9×7,1 мм (таблица 4.10).

Плотность тока в обмотке:

$$J_2 = \frac{I_2}{\Pi_2} = \frac{26,4}{7,625 \cdot 10^{-6}} = 3,46 \frac{\text{МА}}{\text{м}^2}$$

На графиках (рисунок 5.34а) определяем ($J_2 = 3,46 \frac{\text{МА}}{\text{м}^2}$ и $b = 5,6$ мм)

плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности обмотки $q \approx 600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Принимаем конструкцию обмотки с радиальными каналами по $h'_K = 4,5$ мм между всеми катушками (рисунок 2.4(м)). Две крайние катушки вверху и внизу отделены каналами по 7,5 мм (таблица 4.10). Канал в месте разрыва обмотки $h_{KP} = 12$ мм (таблица 4.9). Осовой размер катушки $b' = 6,1$ мм.

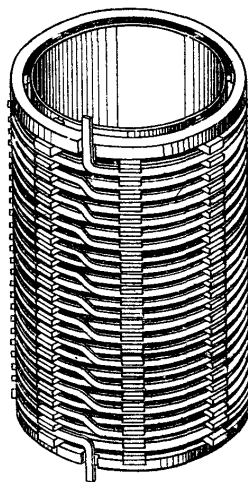


Рисунок 2.4 - Обмотка ВН (непрерывная)

Число катушек на стержне ориентировочно:

$$n_{\text{КАТ}} = \frac{1 \cdot 10^3}{b' + h'_K} \approx \frac{0,635 \cdot 10^3}{6,1 + 4} \approx 62 \text{ катушки}$$

Число витков в катушке ориентировочно: $w_{\text{КАТ}} = \frac{1277}{62} \approx 21$

(рисунок 2.5(м)), и радиальный размер $a'_2 = 1,9 \cdot 21 = 39,9 \approx 40$ мм, с учетом катушек с усиленной изоляцией $a_2 = 42$ мм.

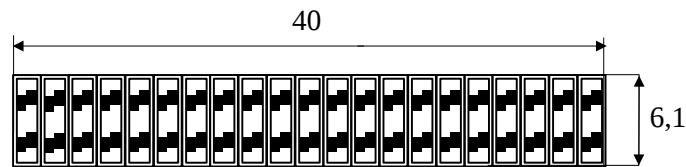


Рисунок 2.5 - Сечение катушки непрерывной обмотки ВН.
Масштаб 2:1

Распределение витков по катушкам показано в таблице 2.3(м):

Таблица 2.3 - Распределение витков по катушкам:

43 основные катушки В по 22 витков	946
7 основные катушки Г по 21 витку	147
8 регулировочные катушки Д по 15,5 витков	124
4 катушки с усиленной изоляцией Е по 15 витков	60
Всего: 62 катушки	1277

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов показаны на рисунке 2.6(м). Данные катушек приведены в таблицах 2.4(м) и 2.5(м).

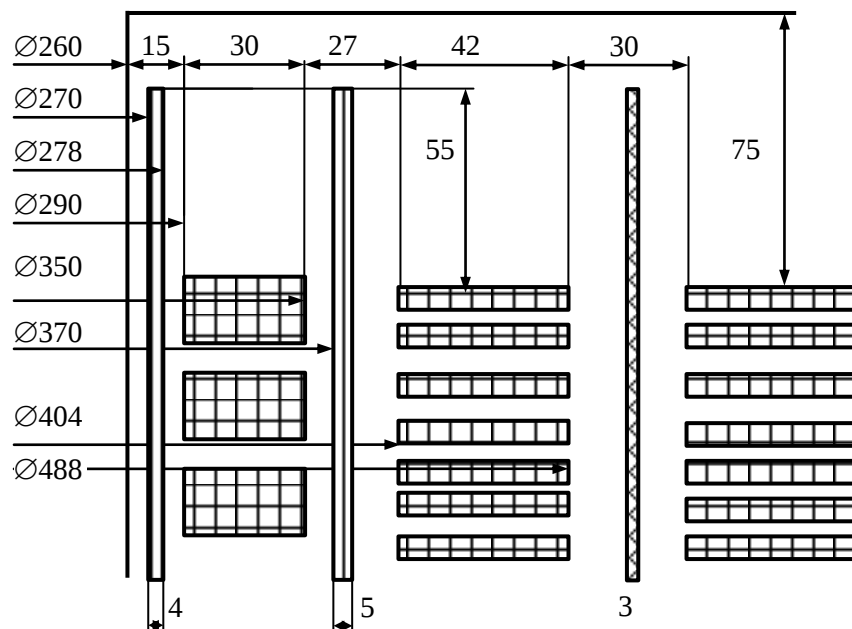


Рисунок 2.6 - Основные размеры обмоток трансформатора
Масштаб 1:2

Осевой размер обмотки:

$$l_2 = \sum h_{\text{КАТ}} + \sum h_{\text{КАН}} = (6,1 \cdot 58 + 7,1 \cdot 4 + 0,95(7,5 \cdot 4 + 12 + 4,5 \cdot 56)) \cdot 10^{-3} = 0,66 \text{ м.}$$

Согласно раздела 4.3 принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра, на котором на 12 рейках наматывается обмотка:

$$\varnothing \frac{0,37}{0,38} \times 0,77 \text{ м}$$

Учитывая условия: испытательные напряжения $U_{\text{исп}}=5 \text{ кВ (НН)}$, $U_{\text{исп}} = 85 \text{ кВ (ВН)}$ и мощности трансформатора $S = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ по таблицам 4.4, 4.5 находим параметры:

Таблица 2.4 – Технические параметры обмоток НН и ВН

Канал между обмотками ВН и НН	$a'_{12}=27 \text{ мм}$
Толщина бумажно-бакелитового цилиндра обмотки НН	$\delta'_{01}=4 \text{ мм}$
Толщина бумажно-бакелитового цилиндра обмотки ВН	$\delta'_{12}=5 \text{ мм}$
Выступ бумажно-бакелитового цилиндра за высоту обмотки НН	$l'_{11}=25 \text{ мм}$
Выступ бумажно-бакелитового цилиндра за высоту обмотки ВН	$l'_{12}=55 \text{ мм}$
Расстояние между обмотками ВН соседних стержней	$a'_{22}=30 \text{ мм}$
Толщина междуфазной перегородки	$\delta'_{22}=3 \text{ мм}$
Расстояние обмотки ВН до ярма	$l_{02}=75 \text{ мм}$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки для самой широкой катушки В (7.19):

$$q_2 = \frac{107 J_2 \cdot 10^6 I \cdot w_K k_D}{k_3(b' + a_2)} \cdot 10^{-10} = \frac{107 \cdot 3,46 \cdot 10^6 \cdot 26,4 \cdot 22 \cdot 1,05}{0,75(0,0061 + 0,0042)} \cdot 10^{-10} =$$

$$= 625 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Таблица 2.5 - Параметры катушек обмотки ВН трансформатора

Данные	Обозначения катушек				Всего
	В	Г	Д	Е	
Назначение катушки	Основная	Основная	Регулировочная	С усиленной изоляцией	-
Катушек на стержень	43	7	8	4	62
Число витков в катушке	22	21	15,5	15	-
Всего	946	147	124	60	1277
Размеры провода без изоляции, мм	1,4×5,6			1,4×5,6	-
Размеры провода с изоляцией, мм	1,9×6,1			2,9×7,1	-
Сечение витка, мм ²	7,625	7,625	7,625	7,625	7,625
Плотность тока, МА/м ²	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46
Размер, мм радиальный осевой	42 6,1	42 6,1	40 6,1	43,5 7,1	42 660
Масса провода, кг: без изоляции с изоляцией	-	-	-	-	364,8 372,1
Диаметры, м: внутренний внешний	-	-	-	-	0,404 0,488

Масса металла обмотки (7.6):

$$G'_{O2} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{CP} \cdot w_2 \cdot \Pi_2 = 28 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 0,444 \cdot 1277 \cdot 7,625 \cdot 10^{-6} = 364,8 \text{ кг}$$

Масса провода в обмотке с изоляцией:

$$G_{ПР2} = k_{из} \cdot G_{O2} = 1,035 \cdot 364,8 = 377,6 \text{ кг};$$

где $k_{из} = 1,035$ (таблица 5.5[1])

Масса металла (меди) двух обмоток:

$$G_O = 254,6 + 364,8 = 619,4 \text{ кг.}$$

Масса провода двух обмоток:

$$G_{ПР} = 259,7 + 377,6 = 637,3 \text{ кг.}$$

3 Расчет параметров короткого замыкания

3.1 Расчет потерь короткого замыкания

Основные потери обмотки НН согласно (7.3):

$$P_{OCH1} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J_1^2 \cdot G'_{O1} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot 3,39^2 \cdot 10^{12} \cdot 254,6 = 7022,1 \text{ Вт}$$

Основные потери обмотки ВН:

$$P_{OCH2} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J_2^2 \cdot G'_{O2} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot 3,46^2 \cdot 10^{12} \cdot 364,8 = 10481,3 \text{ Вт}$$

Добавочные потери в обмотке НН (7.14):

$$k_{d1} = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2 = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot 0,268 \cdot 4,5^4 \cdot 10^{-12} \cdot 6^2 = 1,038;$$

$$\beta_1^2 = \left(\frac{b \cdot m \cdot k_p}{1} \right)^2 = \left(\frac{7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 0,95}{0,66} \right)^2 = 0,518^2 = 0,268$$

(Предварительно принимаем $k_p = 0,95$).

Добавочные потери в обмотке ВН (7.14):

$$k_{d2} = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot 0,25 \cdot 1,4^4 \cdot 10^{-12} \cdot 22^2 = 1,005;$$

$$\beta_2^2 = \left(\frac{5,6 \cdot 10^{-3} \cdot 62 \cdot 0,95}{0,66} \right)^2 = 0,25$$

Длина отводов обмотки определяется приближенно (7.21):

$$l_{OTB} = 7,5 \cdot l = 7,5 \cdot 0,66 = 4,95 \text{ м}$$

Масса отводов НН:

$$G_{OTB1} = l_{OTB} \cdot P_{OTB} \cdot \gamma = 4,95 \cdot 394,7 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 = 17,39 \text{ кг}$$

Потери в отводах НН:

$$P_{OTB1} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J_1^2 \cdot G_{OTB1} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot 3,39^2 \cdot 10^{12} \cdot 17,39 = 479,6 \text{ Вт}$$

Масса в отводах ВН:

$$G_{OTB2} = 4,95 \cdot 7,625 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 = 0,336 \text{ кг}$$

Потери в отводах ВН:

$$P_{OTB2} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot 3,46^2 \cdot 10^{12} \cdot 0,336 = 9,7 \approx 10 \text{ Вт}$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкции до выяснения размеров бака определяем приближенно, согласно (7.25) и таблицы 7.1:

$$P_6 = 10 \cdot k \cdot S = 10 \cdot 0,03 \cdot 1600 = 480 \text{ Вт.}$$

Полные потери короткого замыкания:

$$P'_K = P_{OCH1} \cdot k_{d1} + P_{OCH2} \cdot k_{d2} + P_{OTB1} + P_{OTB2} + P_6 =$$

$$=7022,1 \cdot 1,038 + 10481,3 \cdot 1,005 + 479,6 + 10 + 480 = 18792 \text{ Вт}$$

Потери короткого замыкания для номинального напряжения обмотки ВН:

$$P_K = P'_K - 0,05 P_{\text{ОСН2}} \cdot k_{\text{д2}} = 18792 - 0,05 \cdot 10481,3 \cdot 1,005 = 18265 \text{ Вт},$$

$$\text{или } \frac{18265 \cdot 100}{18000} = 101,5 \% \text{ заданного значения.}$$

3.2 Расчет напряжения короткого замыкания

Активная составляющая напряжения короткого замыкания (7.28):

$$u_a = \frac{P_K}{10 \cdot S} = \frac{18265}{10 \cdot 1600} = 1,14 \%$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, согласно (7.32)-(7.35), имеет вид:

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

$$\text{где: } \beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l} = \frac{\pi \cdot 0,377}{0,66} = 1,7945,$$

$$d_{12} = D_1'' + a_{12} = 0,35 + 0,027 = 0,377 \text{ м (рисунок 3,5);}$$

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 0,027 + \frac{0,03 + 0,42}{3} = 0,051 \text{ м}$$

где: a_1 -радиальный размер обмотки НН;
 a_2 - радиальный размер обмотки ВН.

$$k_p = 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}) = 1 - 0,0477(1 - e^{-1/0,0477}) \approx 0,95;$$

$$\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l} = \frac{0,027 + 0,03 + 0,042}{\pi \cdot 0,66} = 0,0477;$$

Учитывая рекомендации разделов 7.2, 7.3, согласно рисунка 3.1(м) по формуле (7.35) определяем k_q :

$$\text{Предварительно: } l_x = h_{\text{кр}} + 4 \cdot b' + 4 \cdot h_k = 0,012 + 4 \cdot 0,0061 + 4 \cdot 0,0045 = 0,055 \text{ м}$$

$$\text{где: } x = \frac{l_x}{l} = \frac{0,055}{0,66} = 0,083,$$

$$\text{окончательно: } k_q = 1 + \frac{l \cdot x^2}{m \cdot a_p \cdot k_p} = 1 + \frac{0,66 \cdot 0,083^2}{3 \cdot 0,051 \cdot 0,95} = 1,031$$

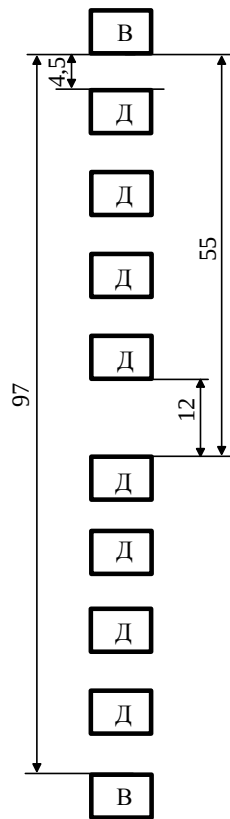


Рисунок 3.1- Определение зоны разрыва в обмотке ВН

Тогда u_p определяем:

$$u_p = \frac{7.9 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p \cdot k_q}{u_B^2} \cdot 10^{-1} =$$

$$= \frac{7.9 \cdot 50 \cdot 533,3 \cdot 1,7945 \cdot 0,051 \cdot 0,95 \cdot 1,031}{16,63^2} \times 10^{-1} = 6,83 \%$$

Напряжение короткого замыкания (7.37):

$$u_k = \sqrt{u_p^2 + u_a^2} = \sqrt{6,83^2 + 1,14^2} = 6,92 \%$$

$$\text{или } \frac{6,92 \cdot 100}{6,5} = 106,5 \% \text{ заданного значения.}$$

3.3 Расчет механических сил в обмотках и нагрев обмоток при коротком замыкании

Установившийся ток короткого замыкания в обмотке ВН определяем по формуле (7.38), с учетом таблицы 7.2:

$$I_{k,y} = \frac{100 \cdot I_{\text{НОМ}}}{u_k \cdot \left(1 + \frac{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}{u_k \cdot S_k}\right)} = \frac{100 \cdot 26,4}{6,92 \cdot \left(1 + \frac{100 \cdot 1600}{6,92 \cdot 2500 \cdot 10^3}\right)} = 378 \text{ A}$$

Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания (7.39):

$$i_{k\max} = 1,41k_{\max}I_{k.y} = 2,25 \cdot 378 = 850,5 \text{ A}$$

При $\frac{u_p}{u_a} = \frac{6,83}{1,14} = 5,99$ по таблице 7.3 определяем $k_m \sqrt{2} = 2,25$.

Радиальная сила определяется (7.43):

$$F_p = 0,628(i_{k\max} \cdot w_{H2})^2 \cdot \beta \cdot k_p \cdot 10^{-6} = 0,628 \cdot (850,5 \cdot 1215)^2 \cdot 1,7945 \cdot 0,95 \cdot 10^{-6} = 1143215 \text{ Н.}$$

Среднее сжимающее напряжение в проводе обмотки НН по (7.48) и (7.49):

$$\sigma_{сж.3} = \frac{F_p}{2\pi \cdot w_1 \cdot \Pi_1} = \frac{1143215}{2\pi \cdot 24 \cdot 394,7 \cdot 10^{-6}} = 19,21 \text{ МПа, что составляет } \frac{19,21}{30} 100 = 64 \text{ \%}.$$

Напряжения на разрыв в наружной обмотке ВН имеет гарантированный запас и может не рассчитываться в трансформаторах мощностью до 6300 кВ·А.

В качестве примера приводится расчет среднего растягивающего напряжения в проводах обмотки ВН по (7.48) и (7.49):

$$\sigma_p = \frac{F_p}{2\pi \cdot w_2 \cdot \Pi_2} = \frac{1143215}{2\pi \cdot 1215 \cdot 7,625 \cdot 10^{-6}} = 19,65 \text{ МПа}$$

т.е. 33 % допустимого значения 60 МПа.

Осевая сила, являющаяся суммой элементарных осевых сил, приложенных к отдельным проводникам обмотки, согласно рисунка 7.11, определяем по формулам (7.43), (7.45):

$$F'_{OC} = F_p \frac{a_p}{2 \cdot l} = 1143215 \frac{0,051}{2 \cdot 0,66} = 44170 \text{ Н}$$

По формуле (7.47) определяем дополнительную осевую силу:

$$F''_{OC} = F_p \frac{l_x}{l'' \cdot k_p \cdot m} = 1143215 \frac{0,097}{0,25 \cdot 0,95 \cdot 4} = 116728 \text{ Н}$$

где $l_x = 12 + 8 \cdot 6,1 + 8 \cdot 4,5 = 96,8$ мм (рисунок 3.1); $m=4$ согласно расположения обмоток (рисунок 7.11в); после установления размеров бака $l''=0,250$ м. Распределение осевых сил показано на рисунке 3.2(м).

Максимальные сжимающие силы в обмотках:

$$F_{СЖ1} = F'_{OC} + F''_{OC} = 44170 + 116728 = 160898 \text{ Н};$$

$$F_{СЖ2} = F''_{OC} - F'_{OC} = 116728 - 44170 = 72558 \text{ Н};$$

Наибольшая сжимающая сила наблюдается в середине обмотки НН, где $F_{СЖ} = 160898$ Н.

Температура обмотки через $t_K = 5$ с после возникновения короткого замыкания по (7.54):

$$\Theta = \frac{670 t_K}{12,5 \left(\frac{u_K}{J \cdot 10^{-6}} \right)^2 - t_K} + \Theta_H = \frac{670 \cdot 5}{12,5 \left(\frac{6,92}{3,46} \right)^2 - 5} + 90 = 164,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

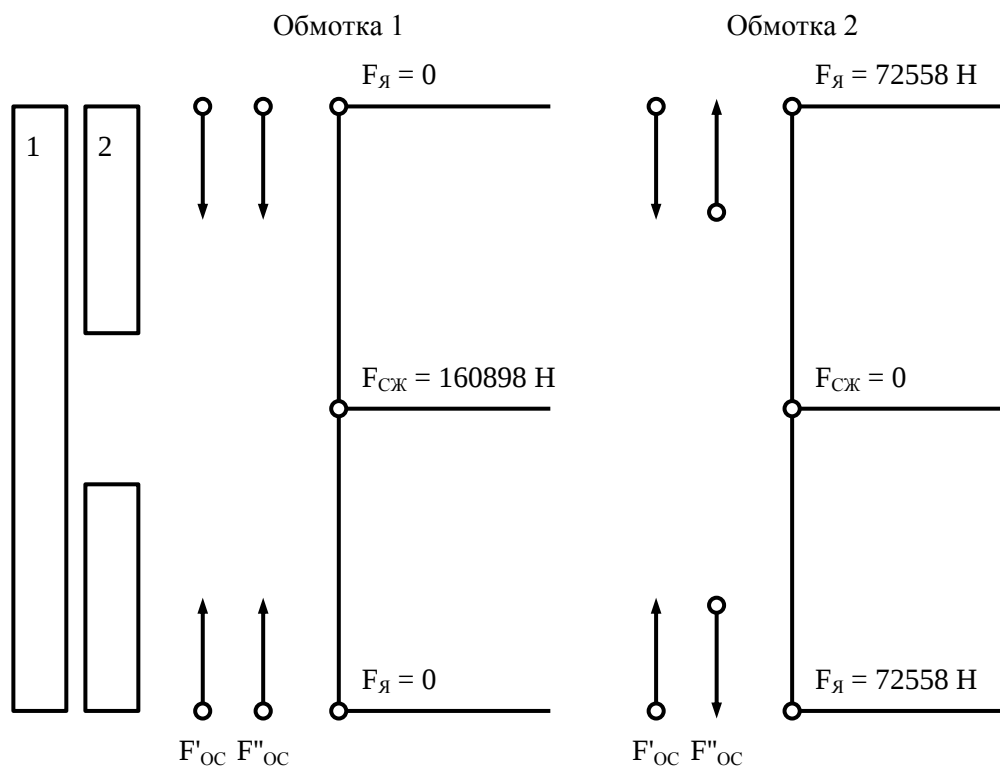


Рисунок 3.2 - Распределение осевых механических сил

4 Расчет магнитной системы

4.1 Определение размеров магнитной системы и массы стали

Принята конструкция трехфазной плоской шихтованной магнитной системы (рисунки 4.1(м), 4.2(м)), собираемой из пластин толщиной 0,35 мм холоднокатаной текстурованной стали марки 3404.

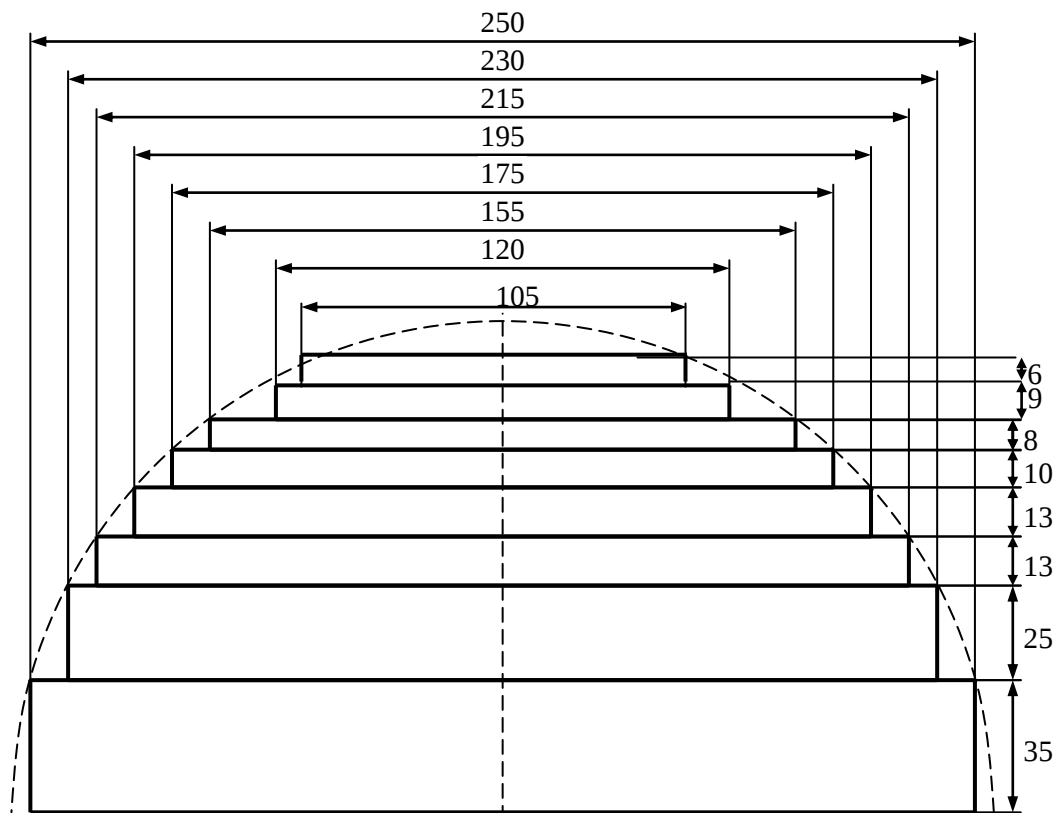


Рисунок 4.1 - Сечение стержня, масштаб 1:2

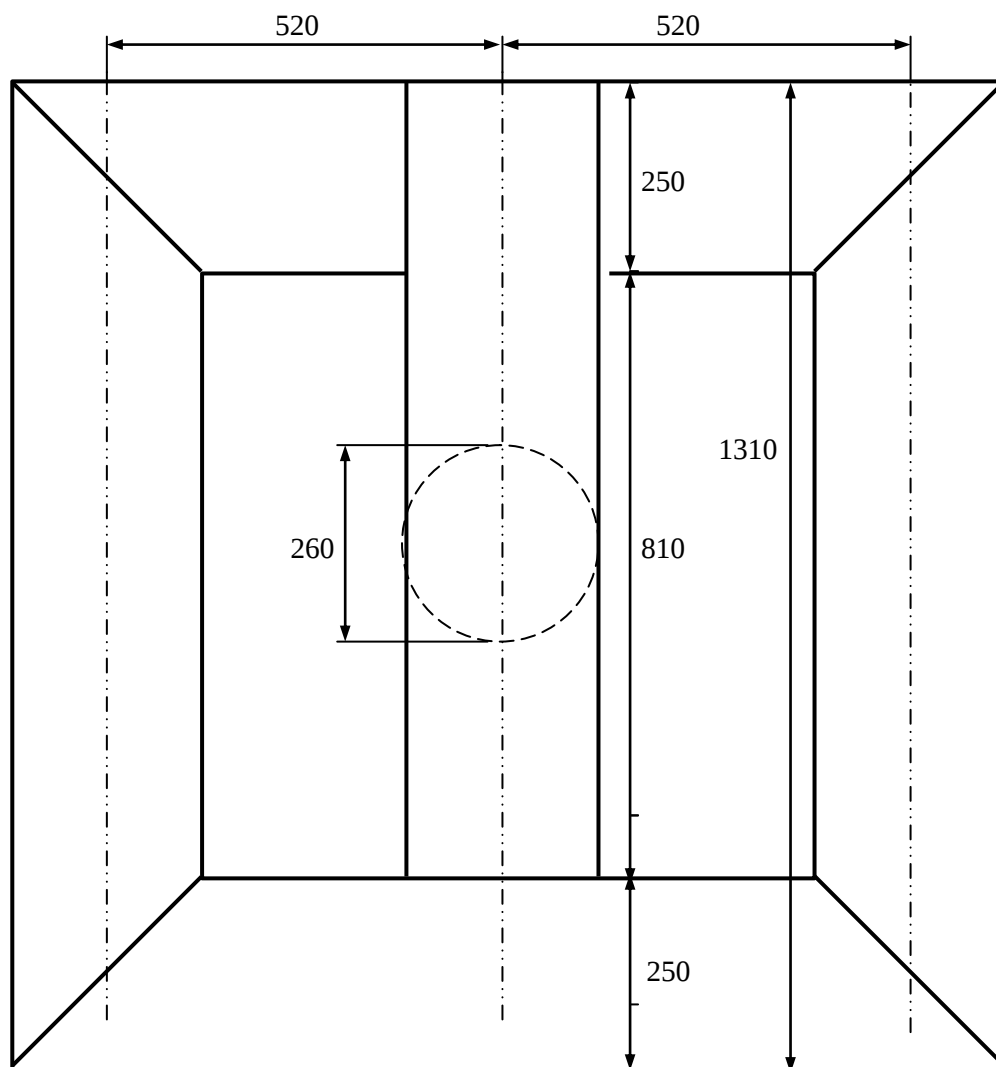


Рисунок 4.2 - Основные размеры магнитной системы,
масштаб 1:10

Стержни магнитной системы скрепляются бандажами из стеклоленты, ярма прессуются ярмовыми балками. Размеры пакетов выбраны по таблице 8.3 для стержня диаметром 0,26 м без прессующей пластиной. Число ступеней в сечении стержня 8, в сечении ярма 6.

Таблица 4.1-Размеры пакетов в сечении стержня и ярма

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо (в половине поперечного сечения), мм
1	250×35	250×35
2	230×25	230×25
3	215×13	215×13
4	195×13	195×13
5	175×10	175×10
6	155×8	155×23
7	120×9	-
8	105×6	

Общая толщина пакетов стержня (ширина ярма) 0,238 м.

Площадь ступенчатой фигуры сечения стержня определяем по таблице 8.7: площадь сечения стержня- $\Pi_{\text{ф.с}}=490,6 \text{ см}^2=0,0044906 \text{ м}^2$, площадь сечения ярма- $\Pi_{\text{ф.я}}=507,1 \text{ см}^2=0,05071 \text{ м}^2$.

Объем угла магнитной системы:

$$V_y = 10746 \text{ см}^3 = 0,010746 \text{ м}^3.$$

Активное сечение стержня:

$$\Pi_c = k_3 \cdot \Pi_{\text{ф.с}} = 0,97 \cdot 0,04906 = 0,04759 \text{ м}^2;$$

активное сечение ярма:

$$\Pi_y = k_3 \cdot \Pi_{\text{ф.я}} = 0,97 \cdot 0,05071 = 0,04919 \text{ м}^2.$$

Объем стали угла магнитной системы:

$$V_{y,CT}=k_3 \cdot V_y=0,97 \cdot 0,010746=0,010424 \text{ м}^3.$$

Длина стержня:

$$l_C=0,66+2 \cdot 0,075=0,81 \text{ м}.$$

Расстояние между осями стержней:

$$C=D''_2+a_{22}=0,488+0,032=0,52 \text{ м}.$$

Массы стали в стержнях и ярмах магнитной системы рассчитываются по (8.6), (8.8) - (8.13).

Масса стали угла магнитной системы:

$$G_y=0,010424 \cdot 7650=79,7 \text{ кг}.$$

Масса стали ярм:

$$\begin{aligned} G_{я}&=G'_{я}+G''_{я}=2 \cdot \Pi_{я} \cdot 2 \cdot C \cdot \gamma_{CT}+2 \cdot G_y= \\ &=2 \cdot 0,04919 \cdot 2 \cdot 0,52 \cdot 7650+2 \cdot 79,7=782,7+159,4=942 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Масса стали стержней:

$$G_C=G'_C+G''_C=884,7+34=918,7 \text{ кг},$$

$$\begin{aligned} \text{где } G'_C &=3 \cdot l_C \cdot \Pi_C \cdot \gamma_{CT}=3 \cdot 0,81 \cdot 0,04759 \cdot 7650=884,7 \text{ кг}; \\ G''_C &=3(\Pi_C \cdot a_{1я} \cdot \gamma_{CT}-G_y)=3(0,04759 \cdot 0,25 \cdot 7650-79,7)=34 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Общая масса стали:

$$G_{CT}=943,5+918,7=1862,2 \text{ кг}.$$

4.2 Расчет потерь холостого хода

Индукция в стержне:

$$B_C = \frac{u_B}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_C} = \frac{16,63}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,04759} = 1,574 \text{ Тл}$$

Индукция в ярме:

$$B_{я} = \frac{u_B}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_{я}} = \frac{16,63}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,04919} = 1,523 \text{ Тл}$$

Индукция на косом стыке:

$$B_{\text{кос}} = \frac{B_C}{\sqrt{2}} = \frac{1,574}{\sqrt{2}} = 1,116 \text{ Тл}$$

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

Площадь сечения стержня на косом стыке:

$$\Pi_{\text{КОС}} = \sqrt{2} \cdot \Pi_{\text{С}} = \sqrt{2} \cdot 0,04759 = 0,0673 \text{ м}^2$$

Удельные потери для стали стержней, ярм и стыков определяем по таблице 8.10 для стали марки 3404 толщиной 0,35 мм:

$$\text{при } B_{\text{С}} = 1,574 \text{ Тл } p_{\text{С}} = 1,23 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}; p_{\text{З}} = 950 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$\text{при } B_{\text{Я}} = 1,523 \text{ Тл } p_{\text{Я}} = 1,14 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}; p_{\text{З}} = 880 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$\text{при } B_{\text{КОС}} = 1,116 \text{ Тл } p_{\text{КОС}} = 440 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

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 применим выражение (8.32), с учетом таблицы 8.12 принимаем:

$$k_{\text{П.Р}}=1,05; k_{\text{П.З}}=1,00; k_{\text{П.Я}}=1,00; k_{\text{П.П}}=1,03; k_{\text{П.Ш}}=1,05.$$

По таблице 8.13 находим коэффициент $k_{\text{П.У}}=10,18$.

Тогда потери холостого хода составят:

$$P_{\text{Х}} = \left[k_{\text{П.Р}} \cdot k_{\text{П.З}} \cdot \left(p_{\text{С}} \cdot G_{\text{С}} + p_{\text{Я}} \cdot G'_{\text{Я}} - 4 p_{\text{Я}} \cdot G_{\text{У}} + \frac{p_{\text{С}} + p_{\text{Я}}}{2} k_{\text{П.У}} \cdot G_{\text{У}} \right) + \sum p_{\text{З}} \cdot n_{\text{З}} \cdot \Pi_{\text{З}} \right] \cdot k_{\text{П.П}} \cdot k_{\text{П.П}} \cdot k_{\text{П.Ш}}$$

$$P_{\text{Х}} = \left[1,05 \cdot 1,00 \cdot (1,23 \cdot 918,7 + 1,14 \cdot 782,7 - 4 \cdot 1,14 \cdot 79,7 + \frac{1,23 + 1,14}{2} \cdot 10,18 \cdot 79,7) + 4 \cdot 0,0673 \cdot 440 + 1 \cdot 0,0476 \cdot 950 + 2 \cdot 0,0492 \cdot 880 \right] \cdot 1,00 \cdot 1,03 \cdot 1,05 = 3246 \text{ Вт}$$

$$\text{или } \frac{3246 \cdot 100}{3100} = 104,7 \% \text{ заданного значения.}$$

4.3 Расчет тока холостого хода

По таблице 8.17 находим удельные намагничивающие мощности:

$$\text{при } B_C = 1,574 \text{ Тл } q_c = 1,62 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{кГ}}; q_{c.3} = 17500 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}$$

$$\text{при } B_{\text{Я}} = 1,523 \text{ Тл } q_{\text{Я}} = 1,44 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{кГ}}; q_{\text{Я.3}} = 14980 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}$$

$$\text{при } B_{\text{КОС}} = 1,116 \text{ Тл } q_{\text{КОС}} = 1460 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}$$

Для принятой конструкции магнитной системы и технологии ее изготовления используем выражение (8.43), в котором согласно таблиц 8.12 и 8.21 задаем коэффициенты:

$$k_{\text{Т.Р}}=1,18; k_{\text{Т.З}}=1,00; k_{\text{Т.ПЛ}}=1,32; k_{\text{Т.Я}}=1,00; k_{\text{Т.П}}=1,05; k_{\text{Т.Ш}}=1,05.$$

По таблице 8.20 находим коэффициент $k_{\text{Т.У}}=42,40$.

Тогда намагничивающая мощность холостого хода составит:

$$\begin{aligned} Q_x &= \left[k_{\text{Т.Р}} \cdot k_{\text{Т.З}} \cdot \left(q_c \cdot G_c + q_{\text{Я}} \cdot G_{\text{Я}}' - 4q_{\text{Я}} \cdot G_{\text{У}} + \frac{q_c + q_{\text{Я}}}{2} k_{\text{Т.У}} \cdot k_{\text{Т.ПЛ}} \cdot G_{\text{У}} \right) + \right. \\ &+ 4 \cdot q_{\text{КОС}} \cdot \Pi_{\text{З.КОС}} + 1q_{c.3} \cdot \Pi_c + 2q_{\text{Я.3}} \cdot \Pi_{\text{Я}} \left. \right] \cdot k_{\text{Т.Я}} \cdot k_{\text{Т.П}} \cdot k_{\text{Т.Ш}} \\ Q_x &= \left[1,18 \cdot 1,00 \cdot (1,62 \cdot 918,7 + 1,44 \cdot 782,7 - 4 \cdot 1,44 \cdot 79,7 + \frac{1,62 + 1,44}{2} \times \right. \\ &\times 42,40 \cdot 1,32 \cdot 79,7) + 4 \cdot 1460 \cdot 0,0673 + 1,0 \cdot 17500 \cdot 0,0476 + \\ &+ 2 \cdot 14980 \cdot 0,04919 \left. \right] \cdot 1,0 \cdot 1,05 \cdot 1,05 = 14660 \text{ В} \cdot \text{А} \end{aligned}$$

Ток холостого хода:

$$i_0 = \frac{Q_x}{10 \cdot S} = \frac{14660}{10 \cdot 1600} = 0,916 \% \text{ или } \frac{0,916}{1,3} 100 = 70 \% \quad \text{заданного}$$

значения.

Активная составляющая тока холостого хода:

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10 \cdot S} = \frac{3246}{10 \cdot 1600} = 0,203 \%$$

Реактивная составляющая тока холостого хода:

$$i_{0p} = \sqrt{i_0^2 - i_{0a}^2} = \sqrt{0,916^2 - 0,203^2} = 0,798 \%$$

5 Тепловой расчет трансформатора

5.1 Тепловой расчет обмоток

Внутренний перепад температуры определяем по формуле (9.9), согласно рисунка 9.9:

$$\Theta_0 = \frac{q \cdot \delta}{\lambda_{из}}$$

где q - плотность теплового потока на поверхности обмотки;
 $\delta = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м - толщина изоляции провода на одну сторону;

$\lambda_{из} = 0,17 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ - теплопроводность бумажной, пропитанной маслом, изоляции провода (таблица 9.1).

Тогда для обмотки НН:

$$\Theta_{01} = \frac{q_1 \cdot \delta}{\lambda_{из}} = \frac{894 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{0,17} = 1,31 ^\circ\text{C};$$

Внутренний перепад температуры обмотки ВН:

$$\Theta_{02} = \frac{q_2 \cdot \delta}{\lambda_{из}} = \frac{625 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{0,17} = 0,92 ^\circ\text{C}$$

Перепад температуры на поверхности обмотки НН (9.20):

$$\Theta_{0,M1} = k_1 k_2 k_3 \cdot 0,35 \cdot q_1^{0,6} = 1,0 \cdot 1,1 \cdot 0,85 \cdot 0,35 \cdot 894^{0,6} = 19,3 ^\circ\text{C}$$

где $k_1 = 1$ - для естественного масляного охлаждения;

$k_2 = 1,1$ - для внутренней обмотки НН;

$k_3 = 0,85$ - по таблице 9.3 для $\frac{h_k}{a} = \frac{5}{30}$.

Перепад температуры на поверхности обмотки ВН:

$$\Theta_{0,M2} = k_1 k_2 k_3 \cdot 0,35 \cdot q_2^{0,6} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,95 \cdot 0,35 \cdot 625^{0,6} = 15,82 ^\circ\text{C}$$

где $k_1 = 1$ - для естественного масляного охлаждения;

$k_2 = 1$ - для наружной обмотки ВН;

$k_3 = 0,95$ - по таблице 9.3 для $\frac{h_k}{a} = \frac{4,5}{42}$.

Полный средний перепад температуры от обмотки НН к маслу:

$$\Theta_{O.M.CP1} = \Theta_{O1} + \Theta_{O.M1} = 1,31 + 19,3 = 20,61^{\circ}\text{C}$$

Полный средний перепад температуры от обмотки ВН к маслу:

$$\Theta_{O.M.CP2} = \Theta_{O2} + \Theta_{O.M2} = 0,92 + 15,82 = 16,74^{\circ}\text{C}$$

5.2 Тепловой расчет бака

По таблице 9.4 в соответствии с мощностью трансформатора выбираем конструкцию бака с одинарными или двойными навесными радиаторами с гнутыми трубами по рисунку 9.17.

Изоляционные расстояния отводов определяем до прессующей балки верхнего ярма и стенки бака. До окончательной разработки конструкции внешние габариты прессующих балок принимаем равными внешнему габариту обмотки ВН.

Минимальная ширина бака:

$$B = D''_2 + (s_1 + s_2 + d_2 + s_3 + s_4 + d_1) \cdot 10^{-3}$$

Изоляционные расстояния:

$s_1 = 32$ мм (для отвода $U_{исп} = 85$ кВ, покрытие 4 мм, расстояние до стенки бака по таблице 4.11);

$s_2 = 42$ мм (для отвода $U_{исп} = 85$ кВ, покрытие 4 мм, расстояние до прессующей балки ярма по таблице 4.11);

$s_3 = 25$ мм (для отвода $U_{исп} = 5$ кВ, без покрытия, расстояние до стенки бака по таблице 4.11);

$s_4 = 90$ мм (для отвода $U_{исп} =$ до 35 кВ, для обмотки $U_{исп} = 85$ кВ, отвод без покрытия по таблице 4.12).

Ширина бака:

$$B = 0,49 + (40 + 42 + 20 + 25 + 90 + 10) \cdot 10^{-3} = 0,717 \text{ м}$$

Принимаем $B = 0,76$ м при центральном положении активной части трансформатора в баке.

Длина бака:

$$A = 2 \cdot C + B = 2 \cdot 0,52 + 0,76 = 1,8 \text{ м.}$$

Высота активной части:

$$H_{A.ч} = 0,81 + 2 \cdot 0,25 + 0,05 = 1,36 \text{ м,}$$

где высота стержня 0,81 м, высота ярма 0,25 м и толщина бруска между дном бака и нижним ярмом 0,05 м.

Принимаем расстояние от верхнего ярма до крышки бака при горизонтальном расположении над ярмом переключателя ответвлений обмотки ВН по таблице 9.5:

$$H_{я.к}=400 \text{ мм}=0,4 \text{ м}$$

Глубина бака:

$$H_B = H_{A.ч} + H_{и.к} = 1,36 + 0,4 = 1,76 \text{ м.}$$

Для развития должной поверхности охлаждения целесообразно использовать радиаторы с прямыми трубами по рисунку 9.16 с расстоянием между осями фланцев $A_p = 1615 \text{ мм}$ (таблица 9.9), с поверхностью труб $\Pi_{тр} = 4,961 \text{ м}^2$ и двух коллекторов $\Pi_{к.к} = 0,34 \text{ м}^2$. Для установки этих радиаторов глубина бака должна быть принята:

$$H_B = A_p + c_1 + c_2 = 1,615 + 0,085 + 0,1 = 1,8 \text{ м,}$$

где c_1 и c_2 - расстояния осей фланцев радиатора от нижнего и верхнего срезов стенки бака по таблице 9.10.

Допустимое превышение средней температуры масла над температурой окружающего воздуха для наиболее нагретой обмотки НН:

$$\Theta_{м.в} = 65 - 20,61 \approx 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Найденное среднее превышение может быть допущено, так как превышение температуры масла в верхних слоях в этом случае будет:

$$\Theta_{м.в.в} = 1,2 \cdot \Theta_{м.в} = 1,2 \cdot 45 = 54 \text{ } ^\circ\text{C} < 60 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Принимая предварительно перепад температуры на внутренней поверхности стенки бака $\Theta_{м.б} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ и запас $2 \text{ } ^\circ\text{C}$, находим среднее превышение температуры наружной стенки бака над температурой воздуха:

$$\Theta_{б.в} = \Theta_{м.в} - \Theta_{м.б} = 45 - 5 - 2 = 38 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для выбранного размера бака рассчитываем поверхность конвекции гладкой стенки бака:

$$\Pi_{к.гл} = H_B \cdot [2 \cdot (A - B) + \pi \cdot B] = 1,8 \cdot [2 \cdot (1,8 - 0,76) + \pi \cdot 0,76] = 8,04 \text{ м}^2$$

Ориентировочная поверхность излучения бака с радиаторами по (9.35):

$$\Pi_{и} = k \cdot \Pi_{к.гл} = 1,5 \cdot 8,04 = 12,06 \text{ м}^2$$

Ориентировочная необходимая поверхность конвекции для заданного значения $\theta_{Б,В}=38\text{ }^{\circ}\text{C}$ по (9.30):

$$\Pi'_K = \frac{1,05(P_K + P_X)}{2,5\theta_{Б,В}^{1,25}} - 1,12\Pi_{II} = \frac{1,05(18000 + 3400)}{2,5 \cdot 38^{1,25}} - 1,12 \cdot 12,06 = 81,76\text{ м}^2$$

Поверхность конвекции составляется из:

- поверхности гладкого бака $\Pi_{К.ГЛ}=8,04\text{ м}^2$;
- поверхности крышки бака

$$\Pi_{К.КР} = 0,5 \left[(A - B)(B + 0,16) + \pi \frac{(B + 0,16)^2}{4} \right] =$$

$$0,5 \left[(1,8 - 0,76)(0,76 + 0,16) + \pi \frac{(0,76 + 0,16)^2}{4} \right] = 0,809\text{ м}^2$$

где 0,16 - удвоенная ширина верхней рамы бака, м; коэффициент 0,5 учитывает закрытие поверхности крышки вводами и арматурой.

Поверхность конвекции радиаторов:

$$\sum \Pi_{К.Р} = 81,76 - 8,04 - 0,809 = 72,91\text{ м}^2$$

Поверхность конвекции радиатора, приведенная к поверхности гладкой стенки (таблица 9.6[1]):

$$\Pi_{К.Р} = \Pi_{ТР} \cdot k_{\Phi} + \Pi_{К.К} = 1,2 \cdot 4,961 + 0,34 = 6,59\text{ м}^2.$$

Необходимое число радиаторов:

$$n_p = \frac{\sum \Pi_{К.р}}{\Pi_{К.р}} = \frac{72,91}{6,59} = 11$$

Принимаем 10 радиатор с расположением по рисунку 9.19.

Поверхность конвекции бака:

$$\Pi_K = \sum \Pi_{К.Р} + \Pi_{К.ГЛ} + \Pi_{К.КР} = 10 \cdot 6,59 + 8,045 + 0,81 = 74,8\text{ м}^2.$$

Поверхность излучения: $\Pi_{II} = 24,47\text{ м}^2$.

5.3 Определение превышений температуры масла и обмоток над температурой охлаждающего воздуха

Среднее превышение температуры наружной поверхности стенки бака над температурой воздуха (9.49):

$$\Theta_{\text{б.в}} = \left[\frac{1,05(P_K + P_X)}{2,8\Pi_{\text{И}} + 2,5\Pi_K} \right]^{0,8} = \left[\frac{1,05(18000 + 3400)}{2,8 \cdot 12,2 + 2,5 \cdot 74,76} \right]^{0,8} = 38,8^\circ\text{C}$$

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой внутренней поверхности стенки бака (9.50):

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{м.б}} &= 0,165 \left[\frac{1,05(P_K + P_X)}{\sum \Pi_p + \Pi_{\text{к.гл}} + 0,5\Pi_{\text{кр}}} \right]^{0,6} = \\ &= 0,165 \left[\frac{1,05(18000 + 3400)}{10 \cdot 4,961 + 8,045 + 0,81} \right]^{0,6} = 5,7^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Превышение средней температуры масла над температурой воздуха:

$$\Theta_{\text{м.в}} = \Theta_{\text{м.б}} + \Theta_{\text{б.в}} = 5,7 + 38,8 = 44,5^\circ\text{C}$$

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой воздуха:

$$\Theta_{\text{м.в.в}} = k \cdot \Theta_{\text{м.в}} = 1,2 \cdot 44,5 = 53,4^\circ\text{C} < 60^\circ\text{C}.$$

Превышение средней температуры обмоток над температурой воздуха:

$$\text{НН } \Theta_{\text{о.в1}} = 1,26 + 18,59 + 44,5 = 64,32^\circ\text{C} < 65^\circ\text{C}.$$

$$\text{ВН } \Theta_{\text{о.в2}} = 0,86 + 15,24 + 44,5 = 60,6^\circ\text{C} < 65^\circ\text{C}.$$

Превышения температуры масла в верхних слоях $\Theta_{\text{м.в.в}} < 60^\circ\text{C}$ и обмоток $\Theta_{\text{о.в}} < 65^\circ\text{C}$ лежат в пределах допустимого нагрева по ГОСТ 11677-85.

Список литературы

- 1 П. М. Тихомиров. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. Москва: "Энергоатомиздат", 1986. — 527 с.
- 2 Гончарук А.И. Расчет и конструирование трансформаторов: Учеб для техникумов. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. — 257 с
- 3 Сергеенков Б.Н. и др. Электрические машины: Трансформаторы. /Б.Н. Сергеенков, В.М. Киселев, Н.А. Акимова – Москва: Высш. шк., 1989. — 352 с
- 4 Технология и механизация производства обмоток и изоляции силовых трансформаторов. /Герасимова Л.С., Дейнега И.А. – Москва: Энергия, 1979. — 336 с
- 5 Белорусов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник /Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева. – 5 изд. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. — 536 с
- 6 Оформление дипломных и курсовых проектов: Метод. указ. /Сост. Г.С. Свирская, В.М. Кипервассер.: СибГИУ. – Новокузнецк, 2002.