

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Агафонов Александр Викторович
Должность: директор филиала
Дата подписания: 19.06.2025 19:06:58
Уникальный идентификационный код:
2539477a8ecf706dc9cff164bc411eb6d3c4ab06

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ЧЕБОКСАРСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) МОСКОВСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Кафедра транспортно-энергетических систем



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

(наименование дисциплины)

**Методические указания по выполнению
курсового проекта**

Направление подготовки	13.03.02 «<u>Электроэнергетика и электротехника</u>» (код и наименование направления подготовки)
Направленность подготовки	«<u>Электроснабжение</u>» (наименование профиля подготовки)
Квалификация выпускника	Бакалавр
Форма обучения	очная и заочная

Чебоксары, 2025

Методические указания разработаны
в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Автор Карчин Игорь Васильевич, кандидат технических наук, доцент
кафедры транспортно-энергетических систем

(указать ФИО, ученую степень, ученое звание или должность)

Методические указания одобрены на заседании кафедры транспортно-энергетических систем (протокол № 8 от 12.04.2025).

В Методических указаниях изложены методология и методика подготовки курсовых проектов, а также требования к их оформлению; даны рекомендации студентам по их защите.

Методические указания предназначены для руководителей курсовых проектов, а также для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Чебоксарском институте (филиале) Московского политехнического университета.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Технические требования, предъявляемые к проектируемому трансформатору.....	5
2. Расчет основных электрических величин и изоляционных расстояний....	6
3. Расчет обмотки НН.....	13
4. Расчет обмотки ВН.....	15
5. Расчет параметров короткого замыкания.....	18
6. Расчет магнитной системы трансформатора.....	21
7. Тепловой расчет трансформатора.....	24
Заключение.....	29
Список литературы	30
Критерии оценки знаний при защите курсового проекта.....	31

ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект по дисциплине «Электрические машины» – предназначена для студентов очной и заочной формы обучения электроэнергетических специальностей и является завершающим этапом изучения курса.

Предлагаемый курсовой проект содержит задания на выполнение расчёта и конструктивного выполнения трёхфазного силового трансформатора.

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Принято различать трансформаторы малой мощности с выходной мощностью 4 кВ·А и ниже для однофазных сетей и 5 кВ·А и ниже для трехфазных сетей и трансформаторы силовые мощностью от 6,3 кВ·А и более для трехфазных и от 5 кВ·А и более для однофазных сетей.

Назначение силовых трансформаторов – преобразование электрической энергии в электрических сетях и установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии. Силовые трансформаторы подразделяются на два вида. Трансформаторы общего назначения предназначены для включения в сеть, не отличающуюся особыми условиями работы. Трансформаторы специального назначения предназначены для непосредственного питания потребительской сети или приемников электрической энергии, если эта сеть или приемники отличаются особыми условиями работы.

Силовой трансформатор является одним из важнейших элементов каждой электрической сети. Передача электрической энергии на большие расстояния от места ее производства до места потребления требует в современных сетях не менее чем пяти - шестикратной трансформации в повышающих и понижающих трансформаторах.

Особо важными задачами являются повышение качества трансформаторов, использование прогрессивной технологии производства, экономия материалов при их производстве и возможно низкие потери энергии при их работе в сети.

1.1. Технические требования, предъявляемые к проектируемому трансформатору

Проектируемый трансформатор должен соответствовать техническим требованиям, изложенным в ГОСТ 12022 – 76 и ГОСТ 11677 – 85:

- 1.1 потери холостого хода не должны превышать заданных более чем на + 7,5%;
- 1.2 ток холостого хода не должен превышать заданного значения более чем на +15%;
- 1.3 потери короткого замыкания не должны превышать заданных более чем на +5%;
- 1.4 напряжение короткого замыкания не должно отклоняться от гарантийного значения более чем на $\pm 5\%$;
- 1.5 плотность тока в алюминиевых обмотках не должна превышать значение $2,7 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$;
- 1.6 механические напряжения в алюминиевых обмотках должны быть меньше 25МПа;
- 1.7 ограничение превышения температуры частей трансформатора сверх температуры охлаждающей среды при сколь угодно длительно поддерживаемых во время испытания нормированных потерях холостого хода и потерях короткого замыкания, приведенных к 75°C:
 - 1.7.1 обмоток не более 65°C;
 - 1.7.2 масла в верхних слоях не более 60°C.

1.2. Порядок оформления курсового проекта

Курсовой проект выполняется на компьютере на стандартных листах А4. Текст печатается на одной стороне листа. На странице должно **располагаться 28-30 строк, каждая из которых содержит 60-65 знаков, включая пробелы. Междустрочный интервал – 1,5, шрифт текста – 14 (Times New Roman), в таблицах - 12, в подстрочных сносках -10.** Текст печатается строчными буквами (кроме заглавных), выравнивается по ширине с использованием переносов слов. На титульном листе надпись: курсовой проект печатаются 18 шрифтом. Подчеркивание слов и выделение их курсивом внутри самой работы не допускается. Однако заголовки и подзаголовки при печатании текста письменной работы выделяются полужирным шрифтом. Абзацный отступ должен **соответствовать 1,25 см** и быть одинаковым по всей работе.

Ориентировочный объем курсового проекта составляет **25-35 страниц**. В данный объем не входят приложения и список использованных источников. По согласованию с преподавателем объём работы может быть увеличен.

Страницы, на которых излагается текст, должны иметь поля: **левое -30 мм, правое - 10 мм, верхнее - 20 мм, нижнее - 20 мм.**

В тексте работы «Введение», название глав, «Заключение» и «Список использованной литературы» печатаются (начинаются) с новой страницы.

Расстояние между заголовком и подзаголовком, заголовком и последующим текстом, подзаголовком и предыдущим текстом отделяют двумя полуторными межстрочными интервалами, а между подзаголовком и последующим текстом - одним полуторным межстрочным интервалом.

Главы письменных работ нумеруются арабскими цифрами и должны начинаться с новой страницы (листа). Номер главы состоит из числа: 1, 2 и т.д.

Заголовки (подзаголовки) располагаются центрированным (посередине текста) способом.

Страницы письменных работ должны иметь сквозную нумерацию арабскими цифрами по всему тексту. Номер страницы проставляют в внизу поля страницы по центру без точки в конце. Первой страницей письменной работы является титульный лист. Он не нумеруется. В работе второй страницей является содержание.

Титульный лист должен содержать наименование учебного заведения, формы обучения, обозначение характера работы (курсовая), ее тему, фамилию, имя, отчество выполнившего ее студента, номер курса и группы, ученую степень, должность или ученое звание научного руководителя, его фамилию и инициалы, графы «Дата сдачи», «Допустить к защите», «Дата защиты», «Оценка», место и год написания работы.

Оглавление работы, которое следует после титульного листа, должно содержать названия элементов структуры работы и номера листов, с которых они начинаются.

При использовании литературы и цитировании отдельных научных положений студент обязан осуществлять в сносках ссылки на авторов и источники, откуда он заимствует материал (фамилия и инициалы автора, название работы, место и год издания, конкретная страница, откуда заимствована цитата). При этом цитирование допускается только в ограниченном объеме, оправданном целью цитирования (для обоснования актуальности рассматриваемого вопроса; демонстрации различных взглядов, существующих в науке по проблемам темы, подтверждения или опровержения выдвигаемых студентом тезисов и т.п.).

Прямое цитирование в тексте обязательно оформляется с помощью кавычек. В случае буквального воспроизведения положений научных трудов без указания на их названия и авторов курсового проекта к защите не допускается.

В списке использованных источников должны быть указаны только те материалы, на которые имеется ссылка (сноска) в работе.

Если в курсовой работе имеются приложения, их необходимо пронумеровать. Все листы курсового проекта должны быть пронумерованы.

Нумерация страниц в курсовой работе должна быть сплошной. Студент отвечает за грамотность и аккуратность оформления курсового проекта.

Наличие грамматических, орфографических и пунктуационных ошибок либо небрежное оформление работы может послужить причиной неудовлетворительной оценки работы.

Порядок представления курсового проекта на защиту

Курсовой проект, подготовленная студентом в окончательной форме, должна быть представлена делопроизводителю кафедры в следующем комплекте:

в письменной форме в прошитом, сброшюрованном или скрепленном виде – 1 экземпляр;

в электронной форме посредством направления на электронный почтовый адрес кафедры транспортно-энергетических систем ttm@chebpolytech.ru – 1 экземпляр.

Делопроизводитель кафедры после регистрации факта и даты сдачи курсового проекта передает ее для проверки научным руководителем.

Передача курсового проекта в электронной форме может быть осуществлена путем направления ее студентом непосредственно научному руководителю по электронной почте.

После поступления курсового проекта на кафедру научный руководитель проверяет ее в течение 14 календарных дней с момента поступления на кафедру, после чего возвращает ее делопроизводителю со своим отзывом. В отзыве указываются следующие положения:

- наименование учебного заведения, кафедры, формы обучения;
- обозначение характера работы (курсовая), ее тему;
- фамилию, имя, отчество выполнившего ее студента, номер курса и группы;
- ученую степень, должность или ученое звание научного руководителя, его фамилию и инициалы;
- соответствие представленной курсового проекта общим требованиям, указанным в настоящих Методических указаниях;
- указание на имеющиеся в курсовой работе недостатки (как по форме, так и по содержанию работы), не препятствующие допуску работы к защите;
- вывод о возможности допуска курсового проекта к защите.

В случае если поставленные научным руководителем вопросы не ясны студенту, он вправе уточнить их у научного руководителя лично во время его еженедельных консультаций (дежурств на кафедре) или дистанционно через электронную почту.

В случае формулирования научным руководителем вывода о невозможности допуска курсового проекта к защите, курсовой проект подлежит подготовке заново с учетом замечаний, указанных научным руководителем, и повторному представлению на защиту в порядке, предусмотренном разделами 3-5, тому же научному руководителю.

Порядок защиты курсового проекта

Защита курсового проекта может проводиться только научному руководителю.

Защита курсового проекта проводится в форме, установленной научным руководителем. При устной форме защиты курсового проекта студент должен подготовить ответы на вопросы, поставленные ему научным руководителем в

рецензии.

Научный руководитель вправе по своему усмотрению задавать студенту дополнительные вопросы для проверки уровня и качества освоения им знаний по теме курсового проекта, а также для дополнительной проверки самостоятельности выполнения курсового проекта.

По итогам защиты научный руководитель определяет, может ли быть защита зачтена, или требуется повторная защита.

По итогам первоначальной или (в случае ее неудачи) повторной защиты курсового проекта научный руководитель ставит отметку о защите курсового проекта в зачетной книжке студента, в ведомости и на титульном листе работы.

После защиты рецензия и курсовой проект подлежит сканированию самим студентом и заливке в Электронную информационно-образовательную среду (Электронное портфолио) Чебоксарского института (филиала) Московского политехнического университета по адресу <http://students.polytech21.ru/login.php>, после чего работа в письменной форме передаются студентом делопроизводителю для хранения в архиве Филиала.

2. Расчет основных электрических величин и изоляционных расстояний

Мощность одной фазы и одного стержня $S_{\phi} = S' = S/3 = 100/3 = 33,3 \text{кВ} \cdot \text{А}$.

Принимаем схему соединения обмоток Y/Y_H . Эта схема при некоторых соотношениях токов и напряжений обеспечивает экономию изоляционных и проводниковых материалов и дает возможность использовать как линейные, так и фазные напряжения.

Номинальные (линейные) токи на сторонах:

$$\text{ВН } I_2 = S/(\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}) = 100 \cdot 10^3/(\sqrt{3} \cdot 20000) = 2,9 \text{А};$$

$$\text{НН } I_1 = S/(\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}) = 100 \cdot 10^3/(\sqrt{3} \cdot 400) = 144 \text{А}.$$

Фазные токи обмоток ВН и НН:

$$\text{ВН } I_{\phi 2} = 2,9 \text{А};$$

$$\text{НН } I_{\phi 1} = I_1 = 144 \text{А}.$$

Фазные напряжения обмоток ВН и НН:

$$U_{\phi 2} = U_{\text{ВН}}/\sqrt{3} = 20000/\sqrt{3} = 11547 \text{В};$$

$$U_{\phi 1} = U_{\text{НН}}/\sqrt{3} = 400/\sqrt{3} = 231 \text{В}.$$

Испытательные напряжения обмоток по табл. 4.1: для обмотки ВН $U_{\text{исп}} = 55 \text{кВ}$; для обмотки НН $U_{\text{исп}} = 5 \text{кВ}$.

В виду широкого применения и распространения алюминия, в целях экономии электролитической меди, а также рекомендации на с. 10 [3] принимаем обмотки из алюминиевого провода.

По табл. 5.8 выбираем тип обмоток:

обмотка ВН при напряжении 20кВ и токе 2,9А цилиндрическая многослойная из круглого алюминиевого провода;

обмотка НН при напряжении 0,4кВ и токе 144А цилиндрическая двухслойная из прямоугольного алюминиевого провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН $U_{\text{исп}} = 55 \text{кВ}$ по табл. 4.5 находим изоляционные расстояния: $l_{02} = 50 \text{мм}$; $a_{12} = 27 \text{мм}$; $\delta_{12} = 5 \text{мм}$; $l_{ц2} = 30 \text{мм}$; $a_{22} = 20 \text{мм}$; $\delta_{и} = 2 \text{мм}$; $\delta_{22} = 3 \text{мм}$; для $U_{\text{исп}} = 5 \text{кВ}$ по табл. 4.4 находим $l_{01} = 50 \text{мм}$; $a_{01} = 4 \text{мм}$; $\delta_{01} = 2 \times 0,5 \text{мм}$.

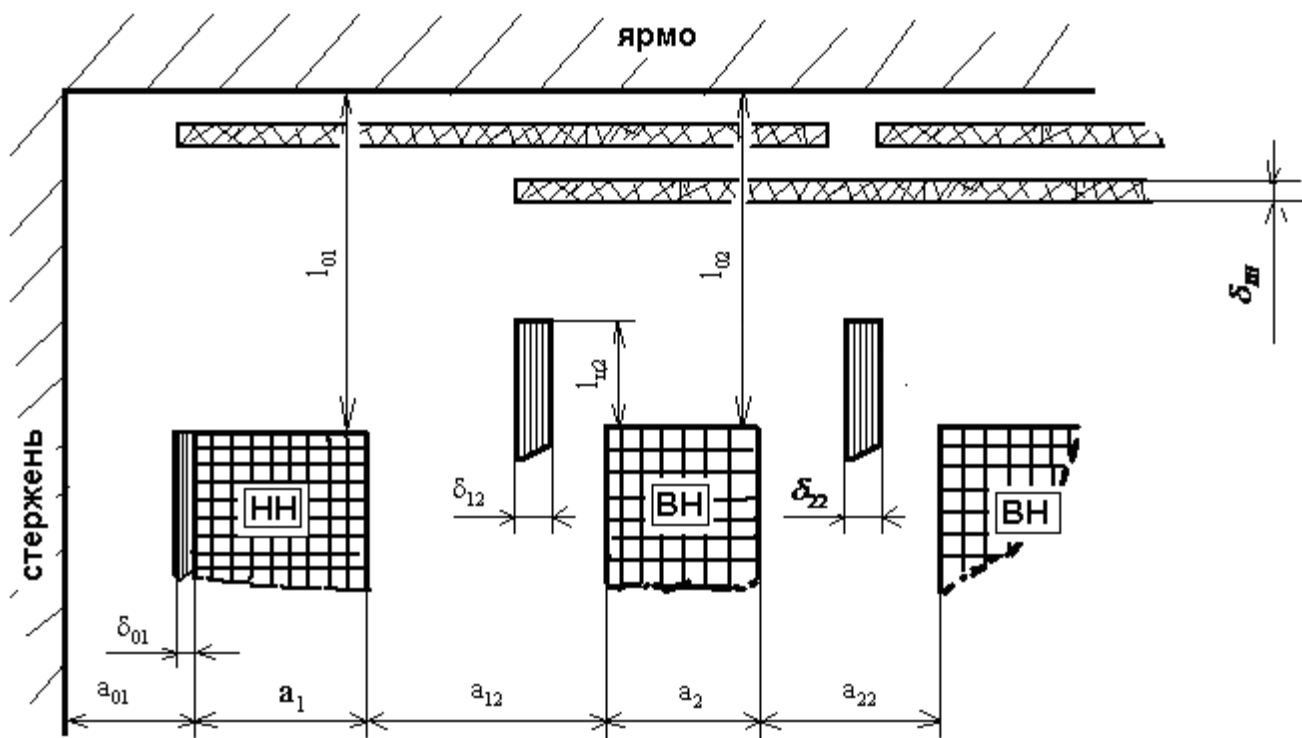


Рис. 2.1. Главная изоляция обмоток ВН и НН

Определение исходных данных расчета

$$(a_1 + a_2)/3 = k \cdot \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2} = 0,813 \cdot \sqrt[4]{33,3} \cdot 10^{-2} = 0,0195\text{м},$$

здесь $k = 0,65 \cdot 1,25 = 0,813$ - коэффициент по табл. 3.3;

$$a_p = a'_{l2_{\text{экp}}} \cdot 10^{-3} + (a_1 + a_2)/3 = 0,030 + 0,0195 = 0,0495\text{м}.$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_a = P_k / (10 \cdot S) = 2270 / (10 \cdot 100) = 2,270\%;$$

реактивная составляющая

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{5,0^2 - 2,27^2} = 4,455\%.$$

Согласно § 2.3 [1] выбираем трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему на рис. 2.5, д [1] с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне на рис. 2.17, б [1]. Прессовка стержней расклиниванием с обмоткой, ярм - стальными балками. По табл. 2.5 ориентировочный диаметр стержня $d=0,140\text{м}$. Материал магнитной системы - холоднокатаная текстурованная рулонная сталь марки 3404 толщиной 0,30мм.

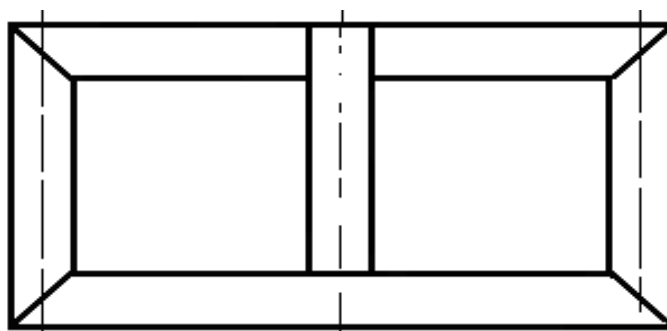


Рис. 2.2 План шихтовки магнитной системы трансформатора

Индукция в стержне $B_c = 1,56 \text{ Тл}$ (табл. 2.4). В сечении стержня 6 ступеней, коэффициент заполнения круга $k_{кр} = 0,912$ (табл. 2.5); изоляция пластин - нагревостойкое изоляционное покрытие, $k_3 = 0,95$ (табл. 2.2). Коэффициент заполнения сталью $k_c = k_3 \cdot k_{кр} = 0,95 \cdot 0,912 = 0,866$. Ярмо многоступенчатое, число ступеней 5, коэффициент усиления ярма $k_я = 1,018$ (табл. 8.6). Индукция в ярме $B_я = B_c / k_я = 1,56 / 1,018 = 1,53 \text{ Тл}$. Индукция в зазоре на прямом стыке $B'_3 = B_c = 1,56 \text{ Тл}$; на косом стыке $B'_3 = B_c / \sqrt{2} = 1,56 / \sqrt{2} = 1,105 \text{ Тл}$.

Удельные потери в стали $p_c = 1,150 \text{ Вт/кг}$; $p_я = 1,090 \text{ Вт/кг}$. Удельная намагничивающая мощность $q_c = 1,511 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_я = 1,395 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; для зазоров на прямых стыках $q'_3 = 20700 \text{ В} \cdot \text{А/м}^2$; для зазоров на косых стыках $q'_3 = 2575 \text{ В} \cdot \text{А/м}^2$ (по табл. 8.10 и 8.17).

По табл. 3.6 находим коэффициент, учитывающий отношение основных потерь в обмотках к потерям короткого замыкания $k_d = 0,97$ и по табл. 3.4 и 3.5 постоянные коэффициенты для алюминиевых обмоток $a = 1,40 \cdot 1,06 = 1,484$ и $b = 0,50 \cdot 1,25 = 0,625$.

Диапазон изменения β от 0,9 до 3,0 (табл. 12.1). Принимаем коэффициент Роговского $k_p = 0,95$ (коэффициент приведения идеализированного поля рассеяния к реальному).

Расчет основных коэффициентов

$$A = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot a_p \cdot k_p}{f \cdot U_p \cdot B_c^2 \cdot k_c^2}} = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{33,3 \cdot 0,0495 \cdot 0,95}{50 \cdot 4,455 \cdot 1,56^2 \cdot 0,866^2}} = 0,1263;$$

$$A_1 = 5,633 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot A^3 \cdot a = 5,633 \cdot 10^4 \cdot 0,866 \cdot 0,1263^3 \cdot 1,484 = 145,9 \text{ кг};$$

$$A_2 = 3,605 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot A^2 \cdot l_0 = 3,605 \cdot 10^4 \cdot 0,866 \cdot 0,1263^2 \cdot 0,050 = 24,9 \text{ кг},$$

$$\text{здесь } l_0 = l_{01} = l_{02} = 0,050 \text{ м};$$

$$B_1 = 2,4 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot k_я \cdot A^3 \cdot (a + b + e) =$$

$$= 2,4 \cdot 10^4 \cdot 0,866 \cdot 1,018 \cdot 0,1263^3 \cdot (1,484 + 0,625 + 0,405) = 107,2 \text{ кг};$$

$$B_2 = 2,4 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot k_я \cdot A^2 \cdot (a_{12\text{экp}} + a_{22}) = 2,4 \cdot 10^4 \cdot 0,866 \cdot 1,018 \cdot 0,1263^3 \cdot (0,030 + 0,020) = 16,9 \text{ кг};$$

$$C = \frac{1,20 \cdot 10^{-2} \cdot S \cdot a^2}{k_d \cdot k_c^2 \cdot U_a \cdot B_c^2 \cdot A^2} = \frac{1,20 \cdot 10^{-2} \cdot 100 \cdot 1,484^2}{0,97 \cdot 0,866^2 \cdot 2,27 \cdot 1,56^2 \cdot 0,1263^2} = 41,2 \text{ кг};$$

$$M = 0,156 \cdot 10^{-6} \cdot K_{\kappa,3}^2 \cdot k_d \cdot k_p \cdot P_{\kappa} / (a \cdot A) = 0,156 \cdot 10^{-6} \cdot 33,89^2 \cdot 0,97 \cdot 0,95 \cdot 2270 / (1,484 \cdot 0,1263) = 2,0 \text{ МПа};$$

$$K_{\kappa,3} = 1,41 \cdot \frac{100}{U_{\kappa}} \cdot (1 + e^{-\pi \cdot U_a / U_p}) = 1,41 \cdot \frac{100}{5,0} \cdot (1 + e^{-\pi \cdot 2,27 / 4,455}) = 33,89.$$

Находим предельные значения β по допустимым значениям плотности тока и растягивающим механическим напряжениям:

$$x_J = 2,7 \cdot \sqrt{12,75 \cdot 41,2 / (0,97 \cdot 2270)} = 1,319;$$

$$x_\sigma = \sqrt[3]{25 / 2,0} = 2,321;$$

$$\beta_J = 1,319^4 = 3,025;$$

$$\beta_\sigma = 2,321^4 = 29,010.$$

Оба полученных значения β лежат за пределами обычно применяемых.

Масса одного угла магнитной системы

$$G_y = 0,486 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot k_\alpha \cdot A^3 \cdot x^3 = 0,486 \cdot 10^4 \cdot 0,866 \cdot 1,018 \cdot 0,1263^3 \cdot x^3 = 8,63 \cdot x^3.$$

Активное сечение стержня

$$\Pi_c = 0,785 \cdot k_c \cdot A^2 \cdot x^2 = 0,785 \cdot 0,866 \cdot 0,1263^2 \cdot x^2 = 0,01085 \cdot x^2.$$

Площадь зазора на прямом стыке $\Pi'_3 = \Pi_c = 0,01085 \cdot x^2$;

площадь зазора на косом стыке $\Pi'_3 = \Pi_c \cdot \sqrt{2} = 0,01085 \cdot \sqrt{2} \cdot x^2 = 0,0153 \cdot x^2$.

Потери холостого хода с учетом табл. 8.10, 8.13 и 8.14

$$\begin{aligned} P_x &= k_{n,\partial} \cdot p_c \cdot (G_c + 0,5 \cdot k_{n,y} \cdot G_y) + k_{n,\partial} \cdot p_\alpha \cdot (G_\alpha - 6 \cdot G_y + 0,5 \cdot k_{n,y} \cdot G_y) = \\ &= 1,12 \cdot 1,150 \cdot (G_c + 0,5 \cdot 10,45 \cdot G_y) + 1,12 \cdot 1,090 \cdot (G_\alpha - 6 \cdot G_y + 0,5 \cdot 10,45 \cdot G_y) = \\ &= 1,288 \cdot G_c + 1,221 \cdot G_\alpha + 5,784 \cdot G_y. \end{aligned}$$

Намагничивающая мощность с учетом табл. 8.17 и 8.20

$$\begin{aligned} Q_x &= k'_{m,\partial} \cdot k''_{m,\partial} \cdot q_c \cdot (G_c + 0,5 \cdot k_{m,y} \cdot k_{m,пл} \cdot G_y) + k'_{m,\partial} \cdot k''_{m,\partial} \cdot q_\alpha \cdot (G_\alpha - 6 \cdot G_y + 0,5 \cdot k_{m,y} \cdot k_{m,пл} \cdot G_y) + \\ &+ k''_{m,\partial} \cdot \sum q_3 \cdot n_3 \cdot \Pi_3 = 1,2 \cdot 1,06 \cdot 1,511 \cdot (G_c + 0,5 \cdot 42,20 \cdot 1,40 \cdot G_y) + 1,2 \cdot 1,06 \cdot 1,395 \cdot (G_\alpha - 6 \cdot G_y + \\ &+ 0,5 \cdot 42,20 \cdot 1,40 \cdot G_y) + 1,06 \cdot 2575 \cdot 4 \cdot 0,0153 \cdot x^2 + 1,06 \cdot 20700 \cdot 3 \cdot 0,01085 \cdot x^2 = \\ &= 1,92 \cdot G_c + 1,77 \cdot G_\alpha + 98,55 \cdot G_y + 881 \cdot x^2. \end{aligned}$$

Весь дальнейший расчет, начиная с определения массы стали магнитной системы, для пяти различных значений β (от 0,9 до 3,0) проводим в форме табл. 2.1.

Таблица 2.1. Предварительный расчет трансформатора

β	0,9	1,2	1,8	2,4	3,0
$x = \sqrt[4]{\beta}$	0,974	1,047	1,158	1,245	1,316
$x^2 = \sqrt[4]{\beta^2}$	0,949	1,096	1,342	1,549	1,732
$x^3 = \sqrt[4]{\beta^3}$	0,924	1,147	1,554	1,928	2,280
$A_1 / x = 145,9 / x$, кг	149,8	139,4	126	117,2	110,9
$A_2 \cdot x^2 = 24,9 \cdot x^2$, кг	23,6	27,3	33,4	38,6	43,1
$G_c = A_1 / x + A_2 \cdot x^2$, кг	173,4	166,7	159,4	155,8	154
$B_1 \cdot x^3 = 107,2 \cdot x^3$, кг	99,1	123	166,6	206,7	244,4
$B_2 \cdot x^2 = 16,9 \cdot x^2$, кг	16	18,5	26,3	26,2	29,3
$G_\alpha = B_1 \cdot x^3 + B_2 \cdot x^2$, кг	115,1	141,5	192,9	232,9	273,7
$G_{cm} = G_c + G_\alpha$, кг	288,5	308,2	352,3	388,9	427,7

β	0,9	1,2	1,8	2,4	3,0
$G_y = 8,63 \cdot x^3, \text{кг}$	8,0	9,9	13,4	16,6	19,7
$1,288 \cdot G_c, \text{Вт}$	223,3	214,7	205,3	200,7	198,4
$1,221 \cdot G_{\text{я}}, \text{Вт}$	140,5	172,8	235,5	284,4	334,2
$5,784 \cdot G_y, \text{Вт}$	46,3	57,3	77,5	96	114
$P_x, \text{Вт}$	410,1	444,8	518,3	581,1	646,6
$\Pi_c = 0,01085 \cdot x^2, \text{м}^2$	0,01030	0,01189	0,01456	0,01681	0,01879
$1,92 \cdot G_c, B \cdot A$	332,9	320,1	306,1	299,1	295,7
$1,77 \cdot G_{\text{я}}, B \cdot A$	203,7	250,5	341,4	412,2	484,5
$98,55 \cdot G_y, B \cdot A$	788,4	975,7	1320,6	1635,9	1941,4
$881 \cdot x^2, B \cdot A$	836,1	965,6	1182,3	1364,7	1525,9
$Q_x, B \cdot A$	2161,1	2511,9	3150,4	3711,9	4247,5
$i_0 = Q_x / (10 \cdot S), \%$	2,161	2,512	3,150	3,712	4,248
$G_0 = C_1 / x^2 = 41,2 / x^2, \text{кг}$	43,4	37,6	30,7	26,6	23,8
$G_{\text{np}} = 1,10 \cdot 1,03 \cdot G_0, \text{кг}$	49,2	42,6	31,9	30,1	27
$k_{\text{oc}} \cdot G_{\text{np}} = 1,84 \cdot G_{\text{np}}, \text{у.е.}$	90,5	78,4	58,8	55,5	49,6
$C_{a,y} = G_{\text{cm}} + k_{\text{oc}} \cdot G_{\text{np}}, \text{у.е.}$	379	386,6	411,1	444,4	477,3
$J = \sqrt{\frac{0,97 \cdot 2270}{12,75 \cdot G_0}} \cdot 10^6, \text{А/м}^2$	$1,995 \cdot 10^6$	$2,143 \cdot 10^6$	$2,372 \cdot 10^6$	$2,548 \cdot 10^6$	$2,694 \cdot 10^6$
$\sigma_p = M \cdot x^3 = 2,0 \cdot x^3, \text{МПа}$	1,85	2,29	3,11	3,86	4,56
$d = A \cdot x = 0,1263 \cdot x, \text{м}$	0,1230	0,1322	0,1463	0,1572	0,1662
$d_{12} = A \cdot d = 1,484 \cdot d, \text{м}$	0,1825	0,1962	0,2170	0,2334	0,2467
$l = \pi \cdot d_{12} / \beta, \text{м}$	0,6369	0,5135	0,3786	0,3053	0,2582
$C = d_{12} + a_{12\text{экр}} + b \cdot d + a_{22}, \text{ м}$	0,3094	0,3288	0,3584	0,3817	0,4006

Результаты расчетов, приведенных в табл. 2.1, покажем в виде графиков.

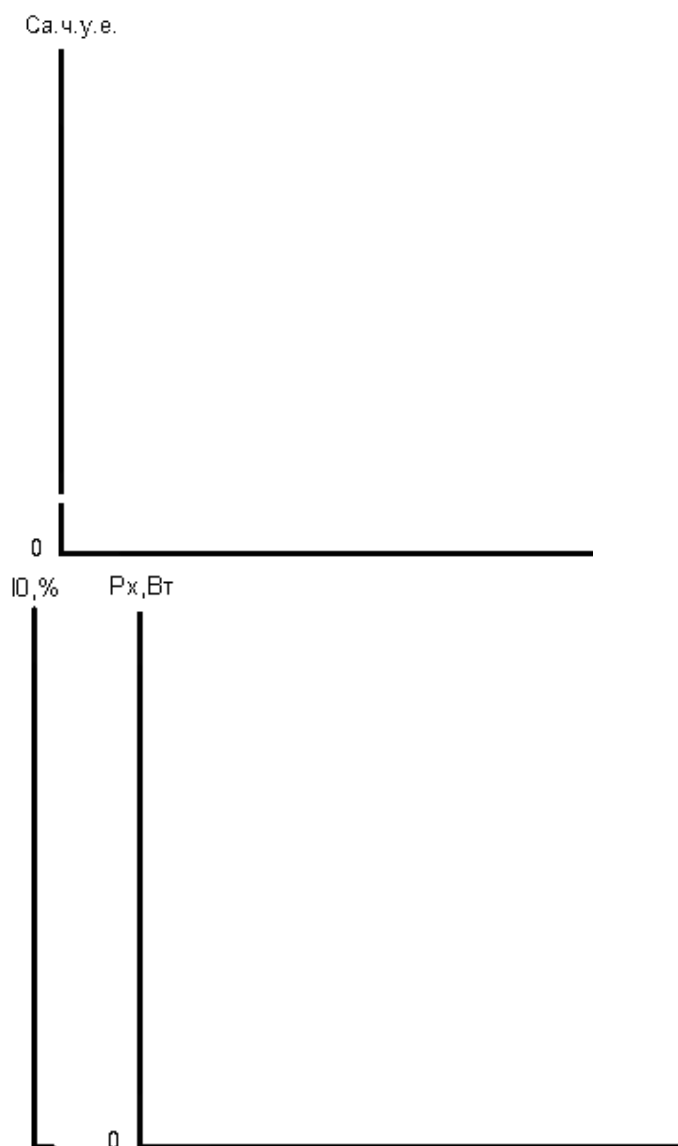
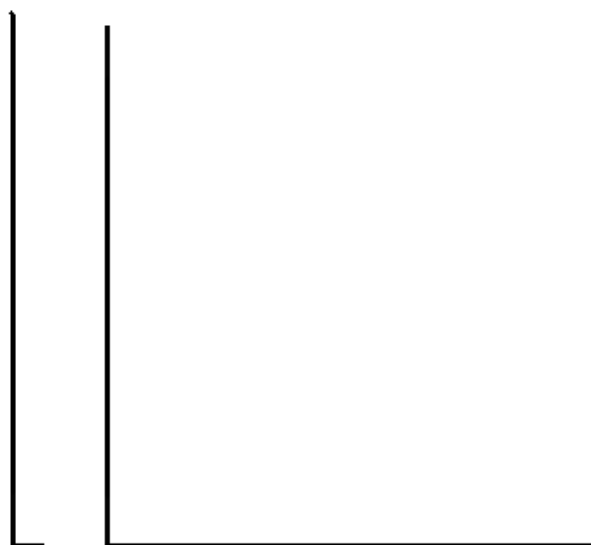


Рис. 2.3. Изменение относительной стоимости активной части с изменением β

Рис.2.4. Изменение потерь и тока холостого хода с изменением β

$\text{МПа} \cdot 10^6, \text{А/м}^2$



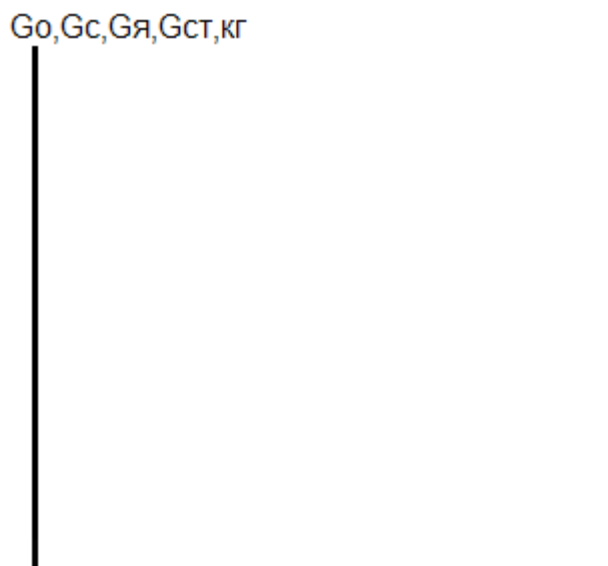


Рис. 2.5. Изменение механических
массы стали
напряжений и плотности
магнитной
тока с изменением β

Рис.2.6. Изменение

стержней, ярм,

системы и металла обмоток
с изменением β

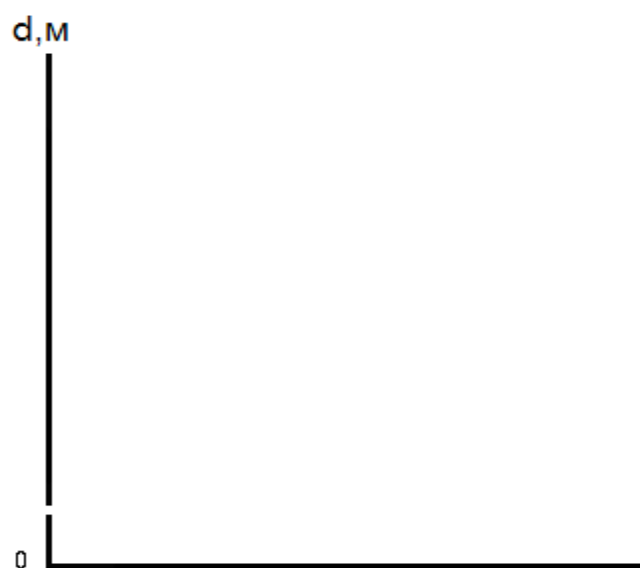


Рис.2.7. Изменение диаметра стержня с изменением β

β

Сл.ч.		Сл.ч. $\geq 1,01 \cdot \text{Сл.ч. min}$
P_x		$P_x > 465 \text{ Вт}$
i_o		$i_o > 2,6\%$
J		$J > 2,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$
σ_p		$\sigma_p > 25 \text{ МПа}$

β

β

Рис. 2.8. Определение оптимального значения β и диаметр стержня

Определение основных размеров

По рис. 2.8 и наиболее оптимальному значению коэффициента β принимаем диаметр стержня магнитной системы $d = 0,125\text{м}$.

Тогда: $x = d/A = 0,125/0,1263 = 0,990$; $\beta = x^4 = 0,990^4 = 0,960$;

$x^2 = \sqrt[4]{\beta^2} = \sqrt[4]{0,960^2} = 0,980$; $x^3 = \sqrt[4]{0,960^3} = 0,969$.

Диаметр стержня

$d = A \cdot x = 0,1263 \cdot 0,990 = 0,125\text{м}$.

Активное сечение стержня по табл. 8.6

$\Pi_c = k_3 \cdot \Pi_{\phi,c} = 0,95 \cdot 0,01123 = 0,010669\text{м}^2$.

Средний диаметр обмоток

$d_{12} = a \cdot d = 1,484 \cdot 0,125 = 0,186\text{м}$.

Высота обмоток

$l = \pi \cdot d_{12} / \beta = \pi \cdot 0,186 / 0,960 \approx 0,605\text{м}$.

Высота стержня

$l_c = l + 2 \cdot l_{01} = 0,605 + 2 \cdot 0,050 = 0,705\text{м}$.

Расстояние между осями стержней

$C = d_{12} + a_{12\text{экв}} + b \cdot d + a_{22} = 0,186 + 0,030 + 0,625 \cdot 0,125 + 0,020 \approx 0,315\text{м}$.

Напряжение одного витка

$U_B = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,56 \cdot 0,010669 = 3,70\text{В}$.

Масса стали

$G_{\text{см}} = G_c + G_{\text{я}} = 145,9/0,990 + 24,9 \cdot 0,980 + 107,2 \cdot 0,969 + 16,9 \cdot 0,980 = 171,8 + 120,2 = 292\text{кг}$.

Масса металла обмоток

$G_0 = 41,2/0,980 = 42,0\text{кг}$.

Масса провода обмоток

$G_{\text{пр}} = 1,10 \cdot 1,03 \cdot G_0 = 1,10 \cdot 1,03 \cdot 42,0 = 47,6\text{кг}$.

Плотность тока

$J = \sqrt{0,97 \cdot 2270 / (12,75 \cdot 42,0)} \cdot 10^6 = 2,028 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2$.

Механические напряжения

$\sigma_p = M \cdot x^3 = 2,0 \cdot 0,969 = 1,94\text{МПа} < 25\text{МПа}$.

Потери холостого хода

$P_x = 1,288 \cdot 171,8 + 1,221 \cdot 120,2 + 5,784 \cdot 8,63 \cdot 0,969 = 416,4\text{Вт} < 465\text{Вт}$.

Ток холостого хода

$i_0 = Q_x / (10 \cdot S) = (1,92 \cdot 171,8 + 1,77 \cdot 120,2 + 98,55 \cdot 8,63 \cdot 0,969 + 881 \cdot 0,980) / (10 \cdot 100) = 2,205\% < 2,6\%$.

Предварительные значения потерь и тока холостого хода получились меньше заданных, значит ход решения правильный и выбор диаметра стержня верный.

3. Расчет обмотки НН

Число витков на одну фазу обмотки НН

$$W_1 = U_{\phi 1} / U_B = 231 / 3,70 = 62.$$

Напряжение одного витка

$$U_B = U_{\phi 1} / W_1 = 231 / 62 = 3,73 \text{ В}.$$

Действительная индукция в стержне

$$B_c = U_B / (4,44 \cdot f \cdot \Pi_c) = 3,73 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,010669) = 1,575 \text{ Тл}.$$

Расчетное значение индукции находится в границах интервала, рекомендуемого табл. 2.4, $(1,55 \div 1,60) \text{ Тл}$.

Средняя плотность тока

$$J_{cp} = \frac{0,463 \cdot k_d \cdot P_k \cdot U_B}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4 = \frac{0,463 \cdot 0,97 \cdot 2270 \cdot 3,73}{100 \cdot 0,186} \cdot 10^4 = 2,045 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Расчетное значение средней плотности тока не выходит за рамки интервала, рекомендуемого табл. 5.7, $(1,2 \div 2,5) \text{ М·А/м}^2$.

Сечение витка ориентировочно

$$\Pi'_1 = I_{\phi 1} / J_{cp} = 144 / (2,045 \cdot 10^6) = 70,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

По табл. 5.8 по мощности 100 кВт·А , току 144 А , напряжению обмотки $0,4 \text{ кВ}$ и сечению витка $70,4 \text{ мм}^2$ выбираем конструкцию цилиндрической двухслойной обмотки из прямоугольного алюминиевого провода.

Число витков в одном слое $W_{c1} = W_1 / 2 = 62 / 2 = 31$.

Ориентировочный осевой размер витка

$$h'_{\phi 1} = l_1 / (W_{c1} + 1) = 0,605 / (31 + 1) = 0,0189 \text{ м}.$$

По табл. 5.2 по ориентировочным данным Π'_1 и $h'_{\phi 1}$ подбираем провод марки АПБ, намотка плашмя:

$$\text{АПБ } 1 \times \frac{4,25 \times 18,00}{4,75 \times 18,50}; \quad 2\delta = 0,50 \text{ мм}; \quad \Pi''_1 = 75,1 \text{ м}^2.$$

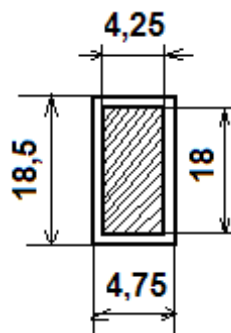


Рис. 3.1. Сечение витка обмотки НН

Полное сечение витка

$$\Pi_1 = n_{\phi 1} \cdot \Pi''_1 = 1 \cdot 75,6 \cdot 10^{-6} = 75,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Плотность тока

$$J_1 = I_{\phi 1} / \Pi_1 = 144 / (75,6 \cdot 10^{-6}) = 1,91 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Осевой размер витка

$$h_{\phi 1} = n_{\phi 1} \cdot b' \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 18,5 \cdot 10^{-3} = 0,0185 \text{ м}.$$

Осевой размер (высота) обмотки НН

$$l_1 = (W_{cn1} + 1) \cdot h_{\epsilon 1} + (0,005 \div 0,015) =$$

$$= (31 + 1) \cdot 0,0185 + (0,005 \div 0,015) = (0,597 \div 0,607) \text{ м},$$

принимаем $l_1 = 0,600 \text{ м}$,

здесь $(0,005 \div 0,015) \text{ м}$ - учитывает неплотность намотки провода и возможное отклонение действительной толщины изоляции от расчетной.

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = [2 \cdot a' + a'_{11}] \cdot 10^{-3} = [2 \cdot 4,75 + 7] \cdot 10^{-3} = 0,0165 \text{ м},$$

здесь $a'_{11} = 7 \text{ мм}$ – осевой охлаждающий канал по табл. 9.2, а.

Согласно табл. 4.4. и § 4.3 [1] обмотка НН наматывается на бумажно-бакелитовом цилиндре с размерами $\varnothing 0,131/0,133 \times 0,600 \text{ м}$.

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = d + 2 \cdot a'_{01} \cdot 10^{-3} = 0,125 + 2 \cdot 0,004 = 0,133 \text{ м};$$

внешний

$$D'_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1 = 0,133 + 2 \cdot 0,0165 = 0,166 \text{ м}.$$

Плотность теплового потока

$$q_1 = P_{осн} \cdot k_{01} / P_{01} = 828 \cdot 1,004 / 1,901 = 437 \text{ Вт} / \text{м}^2 < (1200 \div 1400) \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Расчетное значение плотности теплового потока не превышает предельного допустимого значения $(1200 \div 1400) \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Поверхность охлаждения

$$P_{01} = c \cdot n \cdot k_s \cdot \pi \cdot (D'_1 + D'_1) \cdot l_1 = 3 \cdot 1,5 \cdot 0,75 \cdot \pi \cdot (0,133 + 0,166) \cdot 0,600 = 1,901 \text{ м}^2,$$

здесь: $k_s = 0,75$ – коэффициент закрытия части поверхности.

Потери основные

$$P_{осн1} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J_1 \cdot G_1 = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot 1,91^2 \cdot 10^{12} \cdot 17,81 = 828 \text{ Вт}.$$

Масса металла обмотки

$$G_1 = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{1cp} \cdot W_1 \cdot \Pi_1 = 8,47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot [(0,133 + 0,166)/2] \cdot 62 \cdot 75,6 \cdot 10^{-6} = 17,81 \text{ кг}.$$

Коэффициент добавочных потерь

$$k_{01} = 1,0 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot \beta_1^2 \cdot a^4 \cdot n^2 = 1,0 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot 0,781 \cdot 0,00425^4 \cdot 2^2 = 1,004;$$

$$\beta_1^2 = (b \cdot m \cdot k_p / l_1)^2 = (0,018 \cdot 31 \cdot 0,95 / 0,600)^2 = 0,781;$$

$$m = n_{\epsilon 1} \cdot W_{cn1} = 1 \cdot 31 = 31.$$

Масса провода обмоток

$$G_{np1} = 17,81 + (3,3 \cdot 1,5 / 100) \cdot 17,81 = 18,69 \text{ кг},$$

здесь $3,3 \cdot 5\%$ - увеличение массы провода за счет массы изоляции по табл. 5.5.

4. Расчет обмотки ВН

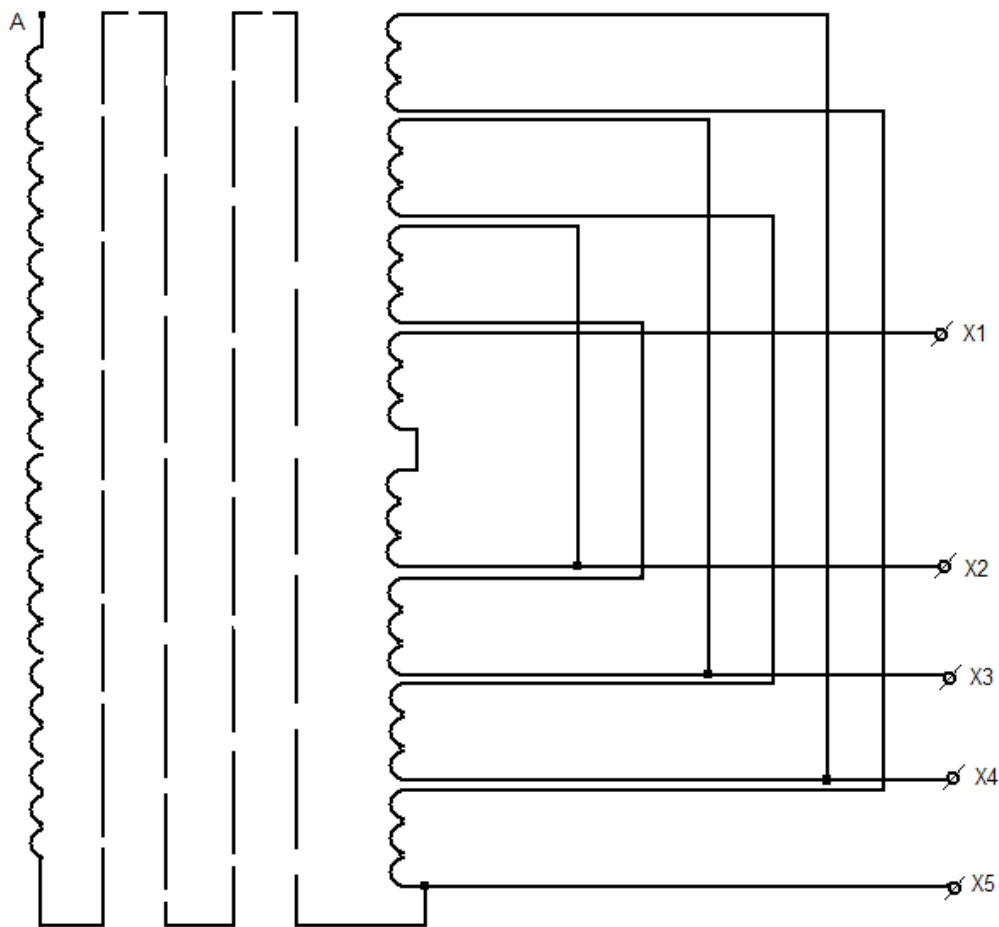


Рис. 4.1. Схема регулирования напряжения в нейтрали

Выбираем схему регулирования напряжения по рис. 6.6, б [1].

Число витков обмотки ВН при номинальном напряжении

$$W_{н2} = U_{\phi 2} / U_B = 11547 / 3,73 = 3096.$$

Число витков на одной ступени регулирования

$$W_p = \Delta U / (\sqrt{3} \cdot U_B) = 500 / (\sqrt{3} \cdot 3,73) = 77.$$

Для пяти ступеней:

Напряжение, В	Число витков на ответвлениях
21000	$3096 + 2 \cdot 77 = 3250$
20500	$3096 + 77 = 3173$
20000	3096
19500	$3096 - 77 = 3019$
19000	$3096 - 2 \cdot 77 = 2942$

Ориентировочная плотность тока

$$J'_2 = 2 \cdot J_{cp} - J_1 = (2 \cdot 2,045 - 1,91) \cdot 10^6 = 2,180 \cdot 10^6 \text{ A} / \text{м}^2.$$

Ориентировочное сечение витка

$$П'_2 = I_{\phi 2} / J'_2 = 2,9 / (2,180 \cdot 10^6) = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

По табл. 5.8 по мощности 100кВ·А, напряжению обмотки 20кВ, току 2,9А и сечению витка 1,33мм² выбираем конструкцию цилиндрической многослойной обмотки из круглого алюминиевого провода.

По табл. 5.1 по ориентировочному данному Π'_2 подбираем провод марки АПБ с размерами:

$$АПБ \times 1 \times \frac{1,40}{1,80}; \quad 2\delta = 0,40 \text{ мм}; \quad \Pi''_2 = 1,51 \text{ мм}^2.$$

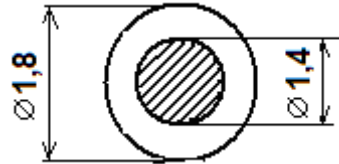


Рис.4.2. Сечение витка обмотки ВН

Полное сечение витка

$$\Pi_2 = n_{\phi 2} \cdot \Pi''_2 = 1 \cdot 1,51 \cdot 10^{-6} = 1,51 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Плотность тока

$$J_2 = I_{\phi 2} / \Pi_2 = 2,9 / (1,51 \cdot 10^{-6}) = 1,92 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2.$$

Высота обмотки ВН

$$l_2 = l_1 = 0,600 \text{ м}, \text{ так как } l_{01} = l_{02}.$$

Число витков в одном слое

$$W_{\text{сл}2} = l_2 \cdot 10^3 / (n_{\phi 2} \cdot b') - 1 = 600 / (1 \cdot 1,80) - 1 = 332.$$

Число слоев в обмотке

$$n_{\text{сл}2} = W_2 / W_{\text{сл}2} = 3250 / 332 = 9,8 \approx 10.$$

Напряжение двух слоев обмотки

$$U_{\text{м сл}2} = 2 \cdot W_{\text{сл}2} \cdot U_{\phi} = 2 \cdot 332 \cdot 3,73 = 2477 \text{ В}.$$

Междуслойная изоляция по табл. 4.7 – кабельная бумага марки К-120 по ГОСТ 23436 - 83Е, 4 слоя, выступ изоляции 20мм с каждого конца обмотки.

Радиальный размер обмотки

$$\begin{aligned} a_2 &= [a' \cdot n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{м сл}} \cdot (n_{\text{сл}2} - 2) + a''_{22}] \cdot 10^{-3} = \\ &= [1,80 \cdot 10 + 0,48 \cdot (10 - 2) + 7] \cdot 10^{-3} = 0,0288 \text{ м}, \end{aligned}$$

здесь $a''_{22} = 7 \text{ мм}$ – осевой охлаждающий канал по табл. 9.2, а.

Для защиты от импульсных перенапряжений 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.

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_2 = D'_1 + 2 \cdot a'_{12\text{экp}} \cdot 10^{-3} = 0,166 + 2 \cdot 0,030 = 0,226 \text{ м};$$

внешний

$$D''_2 = D'_2 + 2 \cdot a_2 = 0,226 + 2 \cdot 0,0288 = 0,284 \text{ м}.$$

Плотность теплового потока

$$q_2 = P_{осн2} \cdot k_{\partial 2} / \Pi_{02} = 1495 \cdot 1,0004 / 3,589 = 417 \text{ Вт} / \text{м}^2 < (1200 \div 1400) \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Расчетное значение плотности теплового потока не превышает предельного допустимого значения $(1200 \div 1400) \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Поверхность охлаждения по рис. 5. 22, г [1]

$$\Pi_{02} = c \cdot n \cdot k_3 \cdot \pi \cdot (D'_2 + D''_2) \cdot l_2 = 3 \cdot 1,5 \cdot 0,83 \cdot \pi \cdot (0,226 + 0,284) \cdot 0,600 = 3,589 \text{ м}^2,$$

здесь: $n = 1,5$; $k_3 = 0,83$ - коэффициент закрытия части поверхности.

Потери основные

$$P_{осн2} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J_2^2 \cdot G_2 = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot 1,92^2 \cdot 10^{12} \cdot 31,80 = 1495 \text{ Вт}.$$

Масса металла обмоток

$$G_2 = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{2cp} \cdot W_2 \cdot \Pi_2 = 8,47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot [(0,226 + 0,284)/2] \cdot 3250 \cdot 1,51 \cdot 10^{-6} = 31,80 \text{ кг}.$$

Коэффициент добавочных потерь

$$k_{\partial 2} = 1,0 + 0,017 \cdot 10^8 \cdot \beta_2^2 \cdot d^4 \cdot n^2 = 1,0 + 0,017 \cdot 10^8 \cdot 0,542 \cdot 0,0014^4 \cdot 10^2 = 1,0004;$$

$$\beta_2^2 = (d \cdot m \cdot k_p / l_2)^2 = (0,0014 \cdot 332 \cdot 0,95 / 0,600)^2 = 0,542;$$

$$m = W_{сл2} \cdot n_{\partial 2} = 332 \cdot 1 = 332.$$

Согласно табл. 4.5. и § 4.3 [1] принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра между обмотками НН и ВН $\varnothing 0,216/0,226 \times 0,660 \text{ м}$.

Масса провода обмоток

$$G_{пр2} = 31,80 + (3,3 \cdot 5 / 100) \cdot 31,80 = 37,05 \text{ кг},$$

здесь 3,3·5% - увеличение массы провода за счет массы изоляции по табл. 5.1.

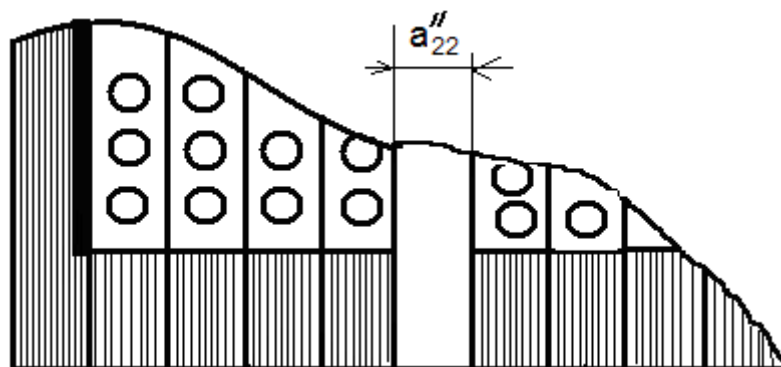


Рис . 4.3. Конструкция обмотки ВН

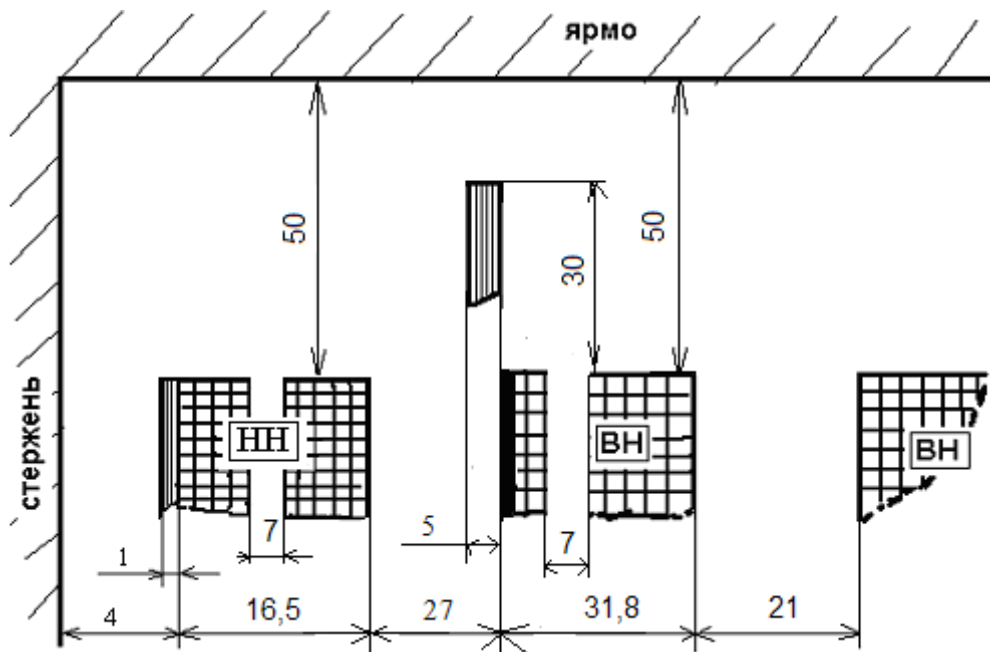


Рис. 4.4. Основные размеры обмоток НН и ВН

5. Расчет параметров короткого замыкания

Потери короткого замыкания

Основные потери (из предыдущих расчетов):

обмотка НН

$$P_{осн1} = 828 \text{ Вт};$$

обмотка ВН

$$P_{осн2} = 1495 \text{ Вт}.$$

Коэффициент добавочных потерь (из предыдущих расчетов):

обмотка НН

$$k_{\sigma1} = 1,004;$$

обмотка ВН

$$k_{\sigma2} = 1,0004.$$

Основные потери в отводах.

Длина отводов НН

$$l_{отв1} = 7,5 \cdot l_1 = 7,5 \cdot 0,600 = 4,50 \text{ м}.$$

Масса отводов НН

$$G_{отв1} = l_{отв1} \cdot \Pi_{отв1} \cdot \gamma_A = 4,50 \cdot 75,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 0,92 \text{ кг}.$$

Потери в отводах НН

$$P_{отв1} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J_1^2 \cdot G_{отв1} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot 1,91^2 \cdot 10^{12} \cdot 0,92 = 43 \text{ Вт}.$$

Длина отводов ВН

$$l_{отв2} = 7,5 \cdot l_2 = 7,5 \cdot 0,600 = 4,50 \text{ м}.$$

Масса отводов ВН

$$G_{отв2} = 4,50 \cdot 1,51 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 0,018 \text{ кг}.$$

Потери в отводах ВН

$$P_{отв2} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot 1,92^2 \cdot 10^{12} \cdot 0,018 = 1 \text{ Вт.}$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкций

$$P_{\sigma} = 10 \cdot k \cdot S = 10 \cdot 0,015 \cdot 100 = 15 \text{ Вт,}$$

здесь $k=0,015$ – коэффициент по табл. 7.1.

Полные потери короткого замыкания

$$P_{\kappa} = P_{осн1} \cdot k_{\sigma1} + P_{осн2} \cdot k_{\sigma2} + P_{отв1} + P_{отв2} + P_{\sigma} = \\ = 828 \cdot 1,004 + 1495 \cdot 1,0004 + 43 + 1 + 15 = 2386 \text{ Вт.}$$

Для номинального числа витков обмотки ВН

$$P_{\kappa} = 2386 - 0,05 \cdot 1495 \cdot 1,0004 = 2311 \text{ Вт, что составляет } 2311 \cdot 100 / 2270 = 101,8\%$$

заданного значения.

Расчетное значение потерь короткого замыкания не превышает предельного допустимого отклонения по ГОСТ 11677 - 85 до +5% от заданного значения.

Расчет напряжения короткого замыкания

Активная составляющая

$$U_a = P_{\kappa} / (10 \cdot S) = 2311 / (10 \cdot 100) = 2,311\%;$$

реактивная составляющая

$$U_p = \frac{7,9 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p}{U_B^2} \cdot 10^{-1} = \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 33,3 \cdot 1,026 \cdot 0,0451 \cdot 0,960}{3,73^2} \cdot 10^{-1} = 4,200\%;$$

где: $\beta = \pi \cdot d_{12} / l_2 = \pi \cdot 0,196 / 0,600 = 1,026$;

$$d_{12} = D_1'' + a_{12экp} = 0,166 + 0,030 = 0,196 \text{ м;}$$

$$a_p = a_{12экp}' + (a_1 + a_2) / 3 = 0,030 + (0,0165 + 0,0288) / 3 = 0,0451 \text{ м;}$$

$$k_p = 1 - \sigma = 1 - 0,040 = 0,960;$$

$$\sigma = (a_{12экp}' + a_1 + a_2) / (\pi \cdot l_2) = (0,030 + 0,0165 + 0,0288) / (\pi \cdot 0,600) = 0,040.$$

Напряжение короткого замыкания

$$U_{\kappa} = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{2,311^2 + 4,200^2} = 4,794\%, \text{ что составляет } 4,794 \cdot 100 / 5,0 = 95,9\%$$

заданного значения.

Расчетное значение напряжения короткого замыкания находится в границах предела допустимого отклонения до $\pm 5\%$ от заданного значения.

Установившейся ток короткого замыкания (при $S_{\kappa} = \infty$)

$$I_{\kappa,y} = I_{ном} \cdot 100 / U_{\kappa} = 2,9 \cdot 100 / 4,794 = 60,5 \text{ А.}$$

Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания

$$i_{\kappa \max} = \sqrt{2} k_{\max} \cdot I_{\kappa,y} = 1,707 \cdot 60,5 = 103 \text{ А,}$$

$$\text{при } U_p / U_a = 4,200 / 2,311 = 1,82 \quad \sqrt{2} k_{\max} = 1,707 - \text{ по табл. 7.3.}$$

Радиальная сила

$$F_p = 0,628 \cdot (i_{\kappa \max} \cdot W_2)^2 \cdot \beta \cdot k_p \cdot 10^{-6} = 0,628 \cdot (103 \cdot 3250)^2 \cdot 1,026 \cdot 0,960 \cdot 10^{-6} = 69314 \text{ Н.}$$

Среднее сжимающее напряжение в проводах обмотки НН

$$\sigma_{сж.р} = \frac{F_p}{2\pi \cdot W_1 \cdot \Pi_1} = \frac{69314}{2\pi \cdot 62 \cdot 75,6 \cdot 10^{-6}} = 2,36 \text{ МПа} < 15 \text{ МПа}.$$

Полученное значение $\sigma_{сж.р}$ обеспечивает условие стойкости обмоток, так как не превышает предельного допустимого значения 15 МПа.

Среднее растягивающее напряжение в проводах обмотки ВН

$$\sigma_p = \frac{F_p}{2\pi \cdot W_2 \cdot \Pi_2} = \frac{69314}{2\pi \cdot 3250 \cdot 1,51 \cdot 10^{-6}} = 2,25 \text{ МПа} < 25 \text{ МПа}.$$

Значение σ_p также удовлетворяет условию стойкости обмоток, так не превышает предельных допустимых 25 МПа.

Осевые силы в обмотках

$$F_{oc} = 7,5 \cdot d_{12} \cdot [a_{12экp} + (a_1 + a_2)/2] \cdot (i_{k \max} \cdot W_{H2})^2 \cdot K \cdot 10^{-6} / l_2^2 =$$

$$= 7,5 \cdot 0,196 \cdot [0,030 + (0,0165 + 0,0288)/2] \cdot (103 \cdot 3096)^2 \cdot 0,310 \cdot 10^{-6} / 0,600^2 = 6777 \text{ Н},$$

где: $K = \Delta 1 \cdot k_{01} + \Delta 2 \cdot k_{02} = 1,667 \cdot 0,186 + 0 = 0,310$;

$\Delta 1 = 1,0 / l_1 = 1,0 / 0,600 = 1,667$ - по табл. 7.4;

$k_{01} = 0,33 - 1,15 \cdot a_0 / l_2 = 0,33 - 1,15 \cdot 0,0753 / 0,600 = 0,186$;

$a_0 = a_{12экp} + a_1 + a_2 = 0,030 + 0,0165 + 0,0288 = 0,0753 \text{ м}$;

$k_{02} = 0$.

Осевые силы действуют на обе обмотки по рис. 5.1. Наибольшая осевая сила возникает в середине высот обмоток. В середине высоты обмотки НН, имеющей меньший радиальный размер, сжимающее напряжение

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{oc}}{\pi \cdot D_{1cp} \cdot a'} = \frac{6777}{\pi \cdot [(0,133 + 0,166)/2] \cdot 0,0085} = 1,70 \text{ МПа} < 15 \text{ МПа},$$

здесь $a' = 2 \cdot 0,00425 = 0,0085 \text{ м}$ - суммарный радиальный размер проводов обмотки НН.

Температура обмоток через $t_k = 4 \text{ с}$ после возникновения короткого замыкания

$$\Theta = \frac{670 \cdot t_k}{5,5 \cdot [U_{\kappa} / (J \cdot 10^{-6})]^2 - t_k} + \Theta_H = \frac{670 \cdot 4}{5,5 \cdot [4,794 / 1,92]^2 - 4} + 90 = 178,5^\circ \text{C} < 200^\circ \text{C},$$

где J - наибольшая плотность тока;

Θ_H - начальная температура обмоток, обычно $\Theta_H = 90^\circ \text{C}$.

Полученное значение температуры после возникновения короткого замыкания находится ниже предела допустимого нагрева по ГОСТ 11677 - 85 для алюминиевых обмоток до 200°C .

Время достижения температуры 200°C

$$t_{k200} \approx 0,79 \cdot [U_{\kappa} / (J \cdot 10^{-6})]^2 = 0,79 \cdot [4,794 / 1,92]^2 \approx 4,9 \text{ с}.$$

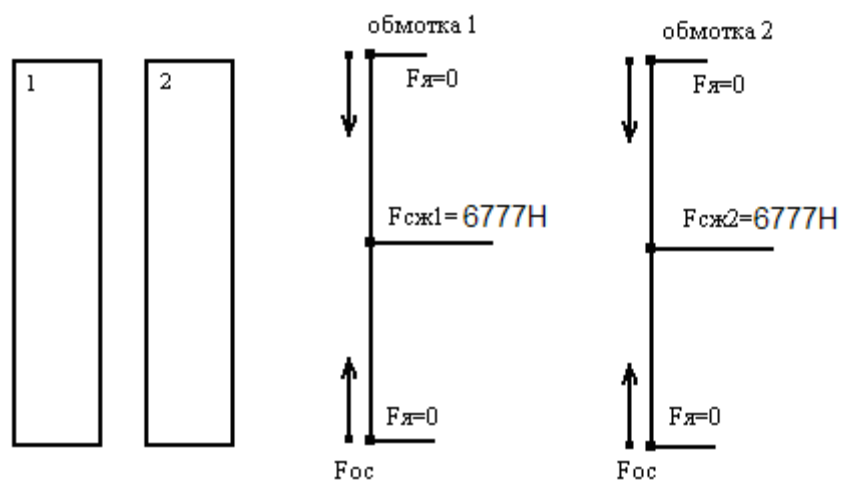


Рис. 5.1. Распределение осевых механических сил в обмотках трансформатора

6. Расчет магнитной системы трансформатора

Определение размеров магнитной системы и массы стали

Принята конструкция трехфазной плоской шихтованной магнитной системы, собираемой из пластин холоднокатаной текстурованной стали марки 3404 толщиной 0,30мм по рис. 6.1 и 6.2. Стержни магнитной системы расклиниваются с обмоткой, ярма прессуются ярмовыми балками. Размеры пакетов выбраны по табл. 8.2 для стержня диаметром $d=0,125\text{м}$ без прессующей пластины. Число ступеней в сечении стержня 6, в сечении ярма 5.

Размеры пакетов в сечении стержня и ярма, по табл. 8.2:

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо (в половине поперечного сечения), мм
1	120x18	120x18
2	105x16	105x16
3	95x6	95x6
4	85x6	85x6
5	65x7	65x13
6	40x6	----

Общая толщина пакетов стержня (ширина ярма) –

$$2 \cdot (18 + 16 + 6 + 6 + 7 + 6) \cdot 10^{-3} = 0,118\text{м}.$$

Площадь ступенчатой фигуры сечения стержня по табл. 8.6:

$$P_{\phi, c} = 112,3\text{см}^2 = 0,01123\text{м}^2;$$

ярма

$$P_{\phi, я} = 115,3\text{см}^2 = 0,01153\text{м}^2.$$

Объем угла магнитной системы

$$V_y = 1194\text{см}^3 = 0,001194\text{м}^3.$$

Активное сечение стержня

$$P_c = k_z \cdot P_{\phi, c} = 0,95 \cdot 0,01123 = 0,010669\text{м}^2;$$

ярма

$$P_y = 0,95 \cdot 0,01153 = 0,010954\text{м}^2.$$

Объем стали угла магнитной системы

$$V_{y, ст} = k_z \cdot V_y = 0,95 \cdot 0,001194 = 0,0011343\text{м}^3.$$

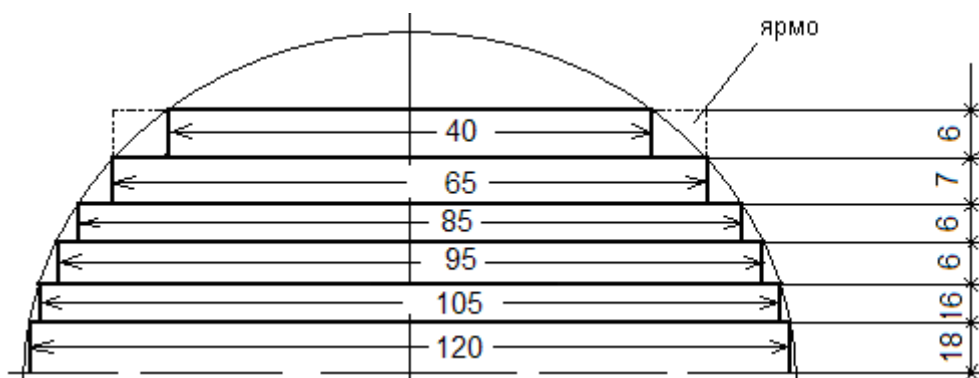


Рис. 6.1. Сечение стержня и ярма

Длина стержня

$$l_c = l_2 + 2 \cdot l_{02} = 0,600 + 2 \cdot 0,050 = 0,700 \text{ м.}$$

Расстояние между осями стержней

$$C = D_2'' + a_{22}' \cdot 10^{-3} = 0,284 + 0,020 \approx 0,305 \text{ м.}$$

Масса стали стержней

$$G_c = G_c' + G_c'' = 171,40 + 3,34 = 174,74 \text{ кг,}$$

где: $G_c' = 3 \cdot l_c \cdot \Pi_c \cdot \gamma_{ст} = 3 \cdot 0,700 \cdot 0,010669 \cdot 7650 = 171,40 \text{ кг;}$

$$G_c'' = 3 \cdot (\Pi_c \cdot a_{1я} \cdot \gamma_{ст} - G_y) = 3 \cdot (0,010669 \cdot 0,120 \cdot 7650 - 8,68) = 3,34 \text{ кг.}$$

Масса стали угла магнитной системы

$$G_y = V_{y,ст} \cdot \gamma_{ст} = 0,0011343 \cdot 7650 = 8,68 \text{ кг.}$$

Масса стали ярм

$$G_{я} = G_{я}' + G_{я}'' = 2 \cdot \Pi_{я} \cdot 2 \cdot C \cdot \gamma_{ст} + 2 \cdot G_y =$$

$$= 2 \cdot 0,010954 \cdot 2 \cdot 0,305 \cdot 7650 + 2 \cdot 8,68 = 102,23 + 17,36 = 119,59 \text{ кг.}$$

Общая масса стали

$$G_{ст} = G_c + G_{я} = 174,74 + 119,59 = 294,33 \text{ кг.}$$

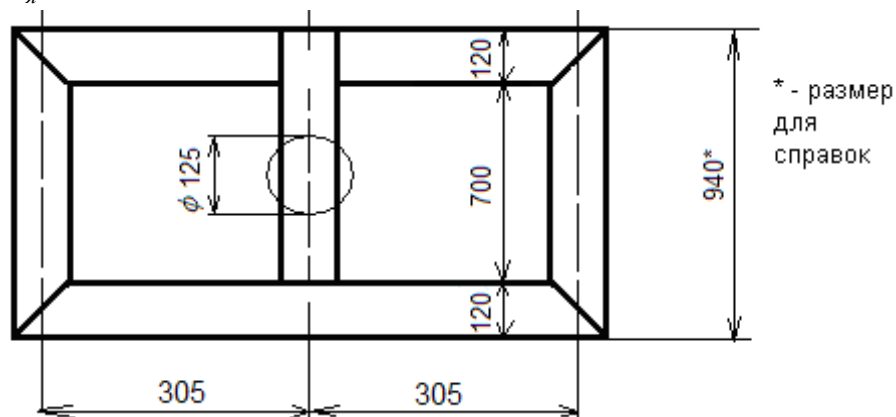


Рис. 6.2. Основные размеры магнитной системы

Расчет потерь холостого хода

Индукция в стержне

$$B_c = U_B / (4,44 \cdot f \cdot \Pi_c) = 3,73 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,010669) = 1,575 \text{ Тл.}$$

Индукция в ярме

$$B_{я} = U_B / (4,44 \cdot f \cdot \Pi_{я}) = 3,73 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,010954) = 1,535 \text{ Тл.}$$

Индукция на косом стыке

$$B_{кос} = B_c / \sqrt{2} = 1,575 / \sqrt{2} = 1,115 \text{ Тл.}$$

Площадь сечения немагнитных зазоров на прямом стыке среднего стержня равны соответственно активным сечениям стержня и ярма. Площадь сечения стержня на косом стыке $\Pi_{кос} = \Pi_c \cdot \sqrt{2} = 0,010669 \cdot \sqrt{2} = 0,0151 \text{ м}^2$.

Удельные потери для стали стержней, ярм и стыков по табл. 8.10 для стали марки 3404 толщиной 0,30мм при шихтовке в две пластины:

при $B_c = 1,575 \text{ Тл}$ $p_c = 1,180 \text{ Вм/кг}$; $p_{c,3} = 955 \text{ Вм/м}^2$;
 при $B_{я} = 1,535 \text{ Тл}$ $p_{я} = 1,100 \text{ Вм/кг}$; $p_{я,3} = 899 \text{ Вм/м}^2$;
 при $B_{кoc} = 1,115 \text{ Тл}$ $p_{кoc} = 443 \text{ Вм/м}^2$.

На основании табл. 8.12 и § 8.2 [1] принимаем коэффициенты: $k_{n,p} = 1,05$, учитывающий влияние резки полосы рулона на пластины; $k_{n,3} = 1,00$, учитывающий удаление заусенцев, $k_{n,я} = 1,00$, учитывающий форму сечения ярма на потери; $k_{n,n} = 1,03$, учитывающий влияние прессовки на потери; $k_{n,и} = 1,01$, учитывающий влияние перешихтовки верхнего ярма остова при установке обмоток.

По табл. 8.13 находим коэффициент увеличения потерь в углах $k_{n,y} = 10,45$.

Потери холостого хода

$$P_x = [k_{n,p} \cdot k_{n,3} \cdot (p_c \cdot G_c + p_{я} \cdot G'_{я} - 4 \cdot p_{я} \cdot G_y + 0,5 \cdot (p_c + p_{я}) \cdot G_y \cdot k_{n,y}) + \sum p_3 \cdot n_3 \cdot \Pi_3] \cdot k_{n,я} \cdot k_{n,n} \cdot k_{n,и} =$$

$$= [1,05 \cdot 1,00 \cdot (1,180 \cdot 174,74 + 1,100 \cdot 102,23 - 4 \cdot 1,100 \cdot 8,68 + 0,5 \cdot (1,180 + 1,100) \cdot 10,45 \cdot 8,68) +$$

$$+ 443 \cdot 4 \cdot 0,0151 + 955 \cdot 1 \cdot 0,010669 + 899 \cdot 2 \cdot 0,010954] \cdot 1,0 \cdot 1,03 \cdot 1,01 = 478 \text{ Вм},$$

что составляет $478 \cdot 100 / 465 = 102,8\%$ заданного значения.

Расчетное значение потерь холостого хода не превышает предельного допустимого отклонения по ГОСТ 11677 – 85 до + 7,5% от заданного значения.

Расчет тока холостого хода

По табл. 8.17 находим удельные намагничивающие мощности:

при $B_c = 1,575 \text{ Тл}$ $q_c = 1,578 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_{c,3} = 21750 \text{ В} \cdot \text{А/м}^2$;
 при $B_{я} = 1,535 \text{ Тл}$ $q_{я} = 1,413 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_{я,3} = 18980 \text{ В} \cdot \text{А/м}^2$;
 при $B_{кoc} = 1,115 \text{ Тл}$ $q_{кoc} = 2725 \text{ В} \cdot \text{А/м}^2 = 2725 \text{ В} \cdot \text{А/м}^2$.

Для принятой конструкции магнитной системы и технологии ее изготовления принимаем коэффициенты по табл. 8.12 и § 8.3 [1]: $k_{m,p} = 1,18$, учитывающий влияние резки полосы рулона на пластины; $k_{m,3} = 1,00$, учитывающий влияние срезание заусенцев; $k_{m,нл} = 1,40$, учитывающий ширину пластин в углах магнитной системы; $k_{m,я} = 1,00$, учитывающий форму сечения ярма; $k_{m,n} = 1,045$, учитывающий влияние прессовки; $k_{m,и} = 1,01$, учитывающий перешихтовку верхнего ярма.

По табл. 8.20 принимаем коэффициент увеличения потерь в углах $K_{m,y} = 42,10$, учитывающий увеличение намагничивающей мощности в углах в зависимости от их числа, тогда намагничивающая мощность холостого хода

$$Q_x = [k_{m,p} \cdot k_{m,3} \cdot (q_c \cdot G_c + q_{я} \cdot C'_{я} - 4 \cdot q_{я} \cdot G_y + 0,5 \cdot (q_c + q_{я}) \cdot K_{m,y} \cdot k_{m,нл} \cdot G_y) + \sum q_3 \cdot n_3 \cdot \Pi_3] \cdot k_{m,я} \cdot k_{m,n} \cdot k_{m,и} =$$

$$= [1,18 \cdot 1,0 \cdot (1,578 \cdot 174,74 + 1,413 \cdot 102,23 - 4 \cdot 1,413 \cdot 8,68 + 0,5 \cdot (1,578 + 1,413) \cdot 42,10 \cdot 1,40 \cdot 8,68) +$$

$$+ 2725 \cdot 4 \cdot 0,0151 + 21750 \cdot 1 \cdot 0,010669 + 18980 \cdot 2 \cdot 0,010954] \cdot 1,0 \cdot 1,045 \cdot 1,01 = 2273 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Ток холостого хода

$$i_o = Q_x / (10 \cdot S) = 2273 / (10 \cdot 100) = 2,273\% < 2,6\%.$$

Расчетное значение тока холостого хода получилось меньше заданного, а так как ГОСТом 11677 - 85 отклонение нормируется только в большую сторону ($\Delta i_o < +15\%$), то полученный результат допустим.

Активная составляющая тока холостого хода

$$i_{oa} = P_x / (10 \cdot S) = 478 / (10 \cdot 100) = 0,478\%;$$

реактивная составляющая

$$i_{op} = \sqrt{i_o^2 - i_{oa}^2} = \sqrt{2,273^2 - 0,478^2} = 2,222\%.$$

7. Тепловой расчет трансформатора

Тепловой расчет обмоток

Внутренний перепад температуры:

обмотка НН

$$\Theta_{01} = q_1 \cdot \delta / \lambda_{из} = 437 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} / 0,17 = 0,64^\circ C,$$

где δ - толщина изоляции провода на одну сторону;

$\lambda_{из} = 0,17 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ C)$ — теплопроводность бумажной, пропитанной маслом, изоляции провода по табл. 9.1;

обмотка ВН

$$\Theta_{02} = \frac{p_2 \cdot a_2'^2}{8 \cdot \lambda_{cp}} = \frac{47711 \cdot 0,0132^2}{8 \cdot 0,336} = 3,09^\circ C,$$

где: потери в единице объема

$$p_2 = \frac{2,71 \cdot J_2^2 \cdot d^2}{(d' + \delta_{мс}) \cdot d'} \cdot 10^{-8} = \frac{2,71 \cdot 1,92^2 \cdot 10^{12} \cdot 1,40^2 \cdot 10^{-6}}{(1,80 + 0,48) \cdot 1,80 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-8} = 47711 \text{ Вт} / \text{м}^3;$$

средняя теплопроводность обмотки

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{мс} \cdot (d' + \delta_{мс})}{\lambda \cdot \delta_{мс} + \lambda_{мс} \cdot d'} = \frac{0,454 \cdot 0,17 \cdot (1,80 + 0,48) \cdot 10^{-3}}{(0,454 \cdot 0,48 + 0,17 \cdot 1,80) \cdot 10^{-3}} = 0,336 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ C);$$

средняя условная теплопроводность

$$\lambda = \lambda_{из} / (0,7 \cdot \sqrt{\alpha}) = 0,17 / (0,7 \cdot \sqrt{0,286}) = 0,454 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ C);$$

здесь $\alpha = (d' - d) / d = (1,80 - 1,40) / 1,40 = 0,286$;

радиальный размер внешней катушки

$$a_2' = [1,80 \cdot 6 + 0,48 \cdot (6 - 1)] \cdot 10^{-3} = 0,0132 \text{ м};$$

средний внутренний перепад

$$\Theta_{02} = (2/3) \cdot 3,09 = 2,06^\circ C.$$

Перепад температуры на поверхности обмоток:

обмотка НН

$$\Theta_{o,m_1} = k \cdot q_1^{0,6} = 0,285 \cdot 437^{0,6} = 10,94^\circ C,$$

здесь $k=0,285$ — коэффициент по с.425 [1];

обмотка ВН

$$\Theta_{o,m_2} = k \cdot q_2^{0,6} = 0,285 \cdot 417^{0,6} = 10,64^{\circ}C.$$

Превышение средней температуры обмоток над температурой масла:

обмотка НН

$$\Theta_{o,m_{cp1}} = \Theta_{01} + \Theta_{o,m_1} = 0,64 + 10,94 = 11,58^{\circ}C;$$

обмотка ВН

$$\Theta_{o,m_{cp2}} = \Theta_{02} + \Theta_{o,m_2} = 2,06 + 10,64 = 12,70^{\circ}C.$$

Тепловой расчет бака

По табл. 9.4 в соответствии с мощностью трансформатора выбираем конструкцию бака со стенками в виде волн по рис. 9.14 [1]. 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:

$S_1 = 30 \text{ мм}$ (для отвода $U_{исп} = 55 \text{ кВ}$, покрытие 2 мм, расстояние до стенки бака по табл. 4.11);

$S_2 = 32 \text{ мм}$ (для отвода $U_{исп} = 55 \text{ кВ}$, покрытие 2 мм, расстояние до прессующей балки верхнего ярма по табл. 4.11);

$S_3 = 20 \text{ мм}$ (для отвода $U_{исп} = 5 \text{ кВ}$, покрытие 2 мм, расстояние до стенки бака по табл. 4.11);

$S_4 = 30 \text{ мм}$ (для отвода $U_{исп} = до 35 \text{ кВ}$, для обмотки $U_{исп} = 55 \text{ кВ}$, покрытие 2 мм по табл. 4.12);

$d_2 = 20 \text{ мм}$; $d_1 = 10 \text{ мм}$ - по с.430 [1].

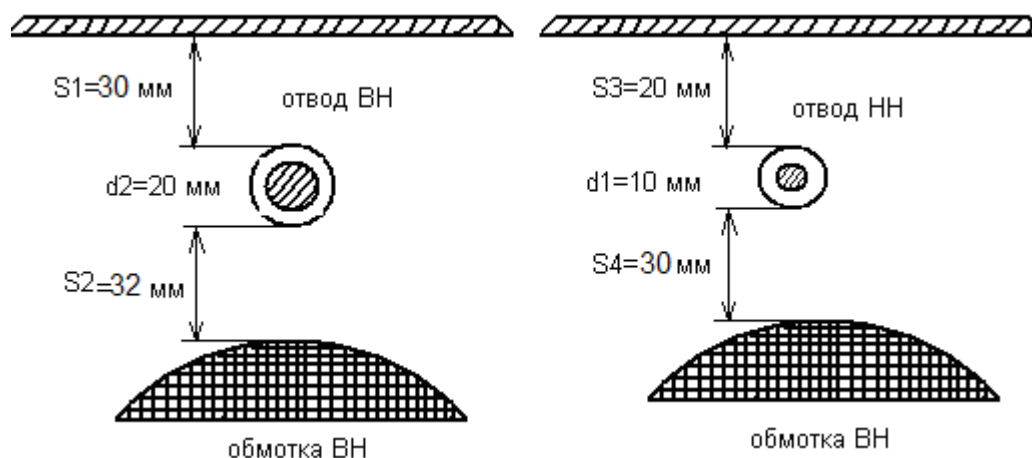


Рис. 7.1. Определение основных расстояний от обмотки ВН до стенки бака

Ширина бака

$$B = 0,284 + (30 + 32 + 20 + 20 + 30 + 10) \cdot 10^{-3} = 0,426 \text{ м},$$

принимаем $B = 0,440 \text{ м}$.

Длина бака

$$A = 2 \cdot C + B = 2 \cdot 0,305 + 0,440 = 1,050 \text{ м}.$$

Высота активной части

$$H_{a,ч} = l_c + 2 \cdot h_y + n \cdot 10^{-3} = 0,700 + 2 \cdot 0,120 + 0,05 = 0,990 \text{ м},$$

здесь $n = (30 \div 50) \text{ мм}$ - толщина бруска между дном бака и нижним ярмом.

Принимаем расстояние от верхнего ярма до крышки бака по табл. 9.5

$$H_{я,к} = 310 \text{ мм} = 0,310 \text{ м}.$$

Глубина бака

$$H_{\delta} = H_{a,ч} + H_{я,к} = 0,990 + 0,310 = 1,300 м.$$

Допустимое превышение средней температуры масла над температурой окружающего воздуха для наиболее нагретой обмотки ВН $\Theta_{м,в} = 65 - \Theta_{о,м,ср2} = 65 - 12,70 = 52,30^{\circ}C$.

Превышение температуры масла в верхних слоях в этом случае будет $\Theta_{м,в,в} = 1,2 \cdot \Theta_{м,в} = 1,2 \cdot 52,3 = 62,8^{\circ}C > 60^{\circ}C$. В этом случае по рекомендации на с. 434 [1] принимают $\Theta_{м,в} = 60^{\circ}C$.

Для развития должной поверхности охлаждения используем стенку в виде волн следующих размеров:

глубина волны $b = 55 мм$;

ширина масляного канала $c = 30 мм$;

ширина воздушного канала $a = 75 мм$ по соотношению $a/c = 2,5$;

толщина стенки $\delta = 1,0 мм$;

высота волнистой стенки $H_{\delta} = H_{\delta} - 0,1 = 1,30 - 0,1 = 1,20 мм$.

Поверхность излучения стенки

$$P_{и,в} = [2 \cdot (A - B) + \pi \cdot (B + 2 \cdot b \cdot 10^{-3})] \cdot H_{\delta} = [2 \cdot (1,05 - 0,44) + \pi \cdot (0,44 + 2 \cdot 0,055)] \cdot 1,20 = 3,536 м^2.$$

Развернутая длина волны

$$l_{\delta} = [2 \cdot b + t - 0,86 \cdot d] \cdot 10^{-3} = [2 \cdot 55 + 107 - 0,86 \cdot 30] \cdot 10^{-3} \approx 0,191 м.$$

Шаг волны стенки

$$t = (a + c + 2 \cdot \delta) \cdot 10^{-3} = (75 + 30 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3} = 107 мм.$$

Число волн

$$m = [2 \cdot (A - B) + \pi \cdot B] / t = [2 \cdot (1,05 - 0,44) + \pi \cdot 0,44] / 0,107 = 24,3,$$

принимаем $m = 24$ волны.

Поверхность конвенции стенки

$$P_{к,в} = m \cdot l_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot H_{\delta} = 24 \cdot 0,191 \cdot 0,997 \cdot 1,20 = 5,484 м^2,$$

здесь k_{δ} - коэффициент, учитывающий затруднение конвекции воздуха в воздушных каналах волн,

$$k_{\delta} = 1 - \alpha^2 / 190 = 1 - 0,733^2 / 190 = 0,997;$$

$$\alpha = b / a = 55 / 75 = 0,733.$$

Полная поверхность излучения бака

$$P_{и} = P_{и,в} + P_{р} + 0,5 \cdot P_{к,р} = 3,536 + 0,257 + 0,279 = 4,072 м^2,$$

где: поверхность крышки бака

$$P_{к,кр} = 0,5 \cdot [(A - B) \cdot (B + 0,10) + \pi \cdot (B + 0,10)^2 / 4] = 0,5 \cdot [(1,05 - 0,44) \cdot (0,44 + 0,10) + \pi \cdot (0,44 + 0,10)^2 / 4] = 0,279 м^2,$$

здесь: 0,100 м – удвоенная ширина верхней рамы бака;

коэффициент 0,5 учитывает закрытие поверхности крышки бака вводами и арматурой.

Поверхность верхней рамы бака

$$\Pi_p = 0,1 \cdot t \cdot m = 0,1 \cdot 0,107 \cdot 24 = 0,257 \text{ м}^2.$$

Полная поверхность конвекции бака

$$\Pi_k = \Pi_{k,6} + \Pi_p + \Pi_{k,кр} = 5,484 + 0,257 + 0,279 = 6,020 \text{ м}^2.$$

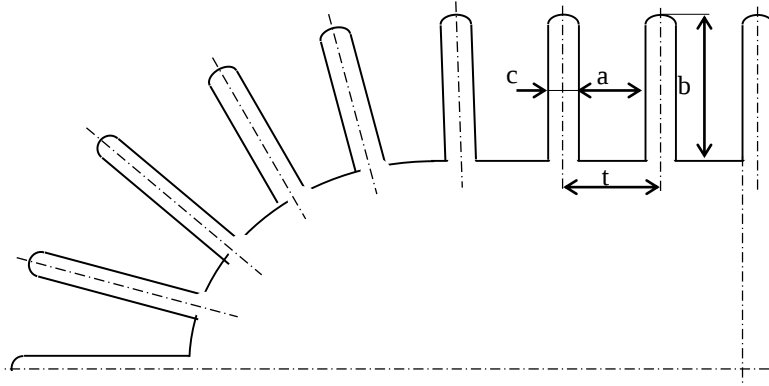


Рис. 7.2. Форма и основные размеры стенки бака с волнами

Среднее превышение температуры стенки бака над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{\delta,6} = \left[\frac{1,05 \cdot (P_k + P_x)}{2,8 \cdot \Pi_u + 2,5 \cdot \Pi_k} \right]^{0,8} = \left[\frac{1,05 \cdot (2311 + 478)}{2,8 \cdot 4,072 + 2,5 \cdot 6,020} \right]^{0,8} = 43,19^\circ \text{C}.$$

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой стенки бака

$$\Theta_{m,6} = 0,165 \cdot \left[\frac{1,05 \cdot (P_k + P_x)}{\Sigma \Pi_k} \right]^{0,6} = 0,165 \cdot \left[\frac{1,05 \cdot (2311 + 478)}{6,020} \right]^{0,6} = 6,76^\circ \text{C}.$$

Превышение средней температуры масла над температурой воздуха

$$\Theta_{m,6} = \Theta_{m,6} + \Theta_{\delta,6} = 6,76 + 43,19 = 49,95^\circ \text{C}.$$

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой воздуха

$$\Theta_{m,6,6} = 1,2 \cdot \Theta_{m,6} = 1,2 \cdot 49,95 = 59,9^\circ \text{C} < 60^\circ \text{C}.$$

Превышение средней температуры обмоток над температурой воздуха:
обмотка НН

$$\Theta_{o,61} = \Theta_{o,мсп1} + \Theta_{m,6} = 0,64 + 10,94 + 49,95 = 61,53^\circ \text{C} < 65^\circ \text{C};$$

обмотка ВН

$$\Theta_{o,62} = \Theta_{o,мсп2} + \Theta_{m,6} = 2,06 + 10,64 + 49,95 = 62,65^\circ \text{C} < 65^\circ \text{C}.$$

Превышение температуры масла в верхних слоях $\Theta_{m,6,6} < 60^\circ \text{C}$ и обмоток

$\Theta_{o,6} < 65^\circ \text{C}$ лежат в пределах допустимого нагрева по ГОСТ 11677 - 85.

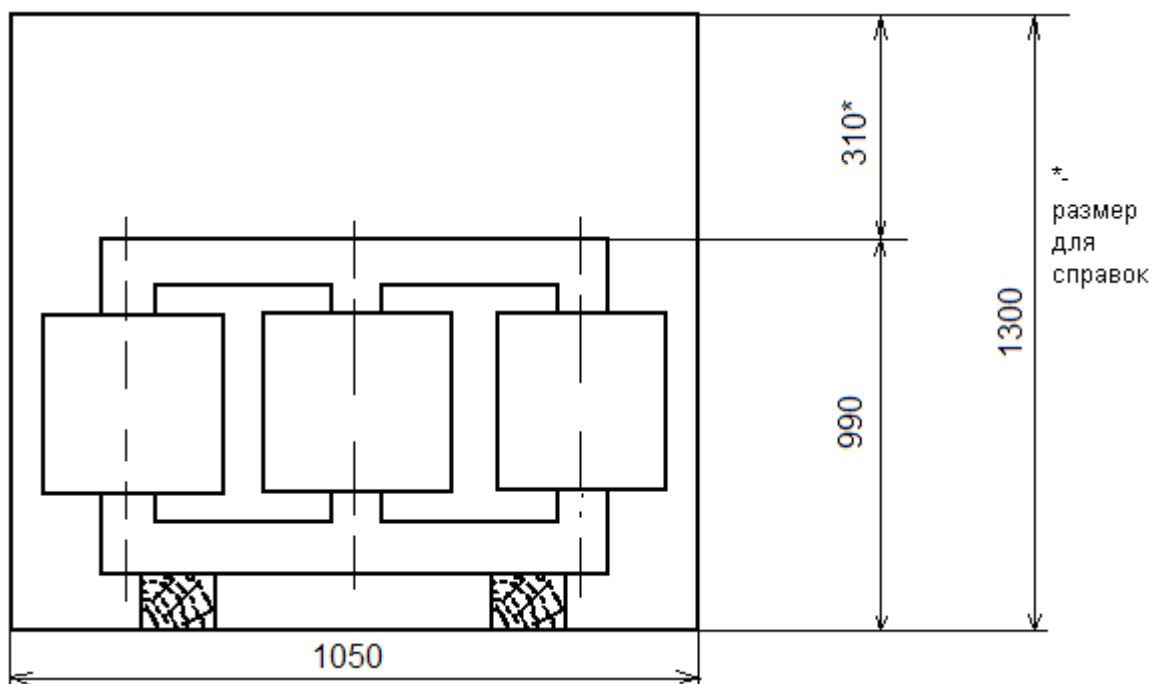


Рис. 7.3. Размещение активной части трансформатора в баке

Определение массы масла

Объем бака

$$V_{\delta} = H_{\delta} \cdot [(A - B) \cdot B + \pi \cdot B^2 / 4] = 1,30 \cdot [(1,05 - 0,44) \cdot 0,44 + \pi \cdot 0,44^2 / 4] = 0,547 \text{ м}^3.$$

Объем активной части

$$V_{a,ч} = 1,2 \cdot \frac{G_{np} + G_{cm}}{\gamma_{a,ч}} = 1,2 \cdot \frac{55,74 + 294,33}{5300} = 0,074 \text{ м}^3,$$

где: масса провода обмоток

$$G_{np} = G_{np1} + G_{np2} = 18,69 + 37,05 = 55,74 \text{ кг};$$

$\gamma_{a,ч} = (5000 \div 5500) \text{ кг} / \text{м}^3$ – средняя плотность активной части при
алюминиевых обмотках.

Объем масла в баке

$$V_{м,б} = V_{\delta} - V_{a,ч} = 0,547 - 0,074 = 0,473 \text{ м}^3.$$

Масса масла в баке

$$G_{м,б} = 900 \cdot V_{м,б} = 900 \cdot 0,473 = 425,51 \text{ кг}.$$

Объем расширителя

$$V_p \approx 0,1 \cdot V_{\delta} = 0,1 \cdot 0,547 \approx 0,055 \text{ м}^3.$$

По табл. 4.2 [2] сравниваем рассчитанную массу масла со стандартными табличными значениями и выбираем расширитель, наиболее подходящий к полученной массе масла, с размерами:

внутренний диаметр – 250мм;

длина – 660мм;

толщина стенок – 1,4мм;

диаметр соединительного патрубка – 19,05мм;

вес масла в расширителе – 21кг;

вес масла в ”прототипе” - 0,4т.

8. Заключение

В данном проекте был рассчитан силовой понижающий трансформатор мощностью 100кВ·А с алюминиевыми обмотками и схемой соединения обмоток Y/Y_H .

В ходе расчета были получены следующие результаты:

индукция в стержне $B_c = 1,575 \text{ Тл}$,

расчетное значение индукции находится в границах интервала, рекомендуемого табл. 2.4, $(1,55 \div 1,60) \text{ Тл}$,

средняя плотность тока $J_{cp} = 2,045 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$,

расчетное значение средней плотности тока не выходит за рамки интервала, рекомендуемого табл. 5.7, $(1,2 \div 2,5) \text{ М·А/м}^2$;

плотности теплового потока обмоток HH $q_1 = 437 \text{ Вт/м}^2$ и BH $q_2 = 417 \text{ Вт/м}^2$,

расчетные значения плотностей теплового потока не превышают предельно допустимых значений $(1200 \div 1400) \text{ Вт/м}^2$;

потери короткого замыкания $P_k = 2311 \text{ Вт}$, что составляет 101,8% заданного значения;

расчетное значение потерь короткого замыкания не превышает предельного допустимого отклонения по ГОСТ 11677 - 85 до +5% от заданного значения;

напряжение короткого замыкания $U_k = 4,794\%$, что составляет 95,9% заданного значения,

расчетное значение напряжения короткого замыкания находится в границах предела допустимого отклонения до $\pm 5\%$ от заданного значения;

среднее сжимающее напряжение в проводах обмотки HH

$$\sigma_{сж.р} = 2,36 \text{ МПа} < 15 \text{ МПа},$$

полученное значение $\sigma_{сж.р}$ не превышает предельного допустимого значения 15МПа;

среднее растягивающее напряжение в проводах обмотки BH

$$\sigma_p = 2,25 \text{ МПа} < 25 \text{ МПа},$$

полученное значение σ_p также удовлетворяет условию стойкости обмоток, так как не превышает предельно допустимых 25МПа;

температура обмоток через 4 с после возникновения короткого замыкания $\Theta = 178,5^\circ \text{C} < 200^\circ \text{C}$,

полученное значение температуры после возникновения короткого замыкания не превышает предельно допустимой температуры для алюминиевых обмоток 200°C ;

потери холостого хода $P_x = 478 \text{ Вт}$, что составляет 102,8% заданного значения,

расчетное значение потерь холостого хода не превышает предельного допустимого отклонения по ГОСТ 11677 – 85 до + 7,5% от заданного значения;

ток холостого хода $i_0 = 2,273\% < 2,6\%$,

расчетное значение тока холостого хода получилось меньше заданного, а так как по ГОСТ 11677 - 85 отклонение нормировано только в большую сторону ($\Delta i_0 < +15\%$), то полученное значение тока холостого хода допустимо;

превышения температуры масла в верхних слоях над температурой воздуха $\Theta_{м,в,в} = 59,9^{\circ}\text{C} < 60^{\circ}\text{C}$ и средней температуры обмоток над температурой воздуха обмоток НН $\Theta_{о,в1} = 61,53^{\circ}\text{C} < 65^{\circ}\text{C}$ и ВН $\Theta_{о,в2} = 62,65^{\circ}\text{C} < 65^{\circ}\text{C}$ лежат в пределах допустимого нагрева по ГОСТ 11677 - 85.

Из вышесказанного следует, что рассчитанный трансформатор соответствует техническим требованиям, изложенным в п.1, значит задание на курсовой проект выполнено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с. : ил.
2. Чешева Т.В., Винокурова Р.Ф., Стукач В.С. Конструирование трансформаторов. Учебное пособие. Томск; ТПУ, 1992. – 116 с.
3. Силовые трансформаторы. Методические указания к выполнению курсового проекта по курсу “Электрические машины” для студентов электротехнических специальностей дневного, вечернего и заочного обучения. Томск, изд. ТПИ им. С.М. Кирова, 1991. – 35 с.
4. Игнатович, В. М. Электрические машины и трансформаторы: учебник для вузов / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. — 7-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 145 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-18047-3. — Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/561182>
5. Электрические машины и трансформаторы: учебник и практикум для вузов / В. И. Киселев, Э. В. Кузнецов, А. И. Копылов, В. П. Лунин. — 3-е изд. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 231 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-21032-3. — Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/569321>

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ ПРИ ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Защита курсового проекта является завершающим этапом данного вида занятия и служит формой проверки выполнения студентами заданий к курсовому проекту и уровня усвоения учебного материала.

Защита проводится в соответствии с графиком до начала экзаменационной сессии и принимается комиссией, члены которой задают вопросы по существу выполненной работы и выносят решение об оценке.

Оценка **«отлично»** выставляется студенту, обнаружившему всесторонние систематические и глубокие знания материала по курсовому проекту, умение свободно выполнять задания.

Оценка **«хорошо»** выставляется студенту, показавшему систематический характер знаний по теме курсового проекта.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется студенту, допустившему погрешности при выполнении курсового проекта, но обладающему необходимыми знаниями для их устранения.

Оценка **«неудовл.»** выставляется студенту, обнаружившему пробелы в знаниях основного материала, допустившему принципиальные ошибки в выполнении курсового проекта.

Заведующему кафедрой транспортно-
энергетических систем Чебоксарского
института (филиала) Московского
политехнического университета

студента _____
группа _____
тел. _____

заявление.

Прошу закрепить за мной тему курсового проекта

« _____ »
_____»

по дисциплине

« _____ ».

и назначить руководителем

Студент _____ / _____ / _____
(подпись) (ФИО студента) (дата)

Руководитель _____ / _____ / _____
(подпись) (ФИО студента) (дата)

Заведующий кафедрой _____ / _____ / _____
(подпись) (ФИО зав. кафедрой) (дата)

Кафедра транспортно-энергетические системы

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине «Электрические машины»

Наименование темы

Рег.номер _____

Выполнил:

студент __ курса, группы _____
_____ формы обучения
по направлению подготовки 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника»

Ф.И.О.

Допущена к защите
«__» _____ 202__г.

Научный руководитель:

должность, звание

подпись

Ф.И.О.

Защита курсового проекта:

Оценка _____

Дата «__» _____ 202__г.

Подпись научного руководителя

Чебоксары 202____г.

РЕЦЕНЗИЯ РУКОВОДИТЕЛЯ на курсовой проект

Студент _____

Кафедра транспортно-энергетические системы

Направление подготовки (специальность) и профиль (специализация)

Наименование темы: _____

Руководитель: _____

должность, звание, Ф.И.О.

1. Актуальность темы курсового проекта

2. Соответствие полученных результатов заявленным целям и задачам

3. Характеристика использования в работе исследовательского инструментария (анализа, синтеза, статистико-математической методологии, пакетов прикладных программ и т.п.)

4. Степень самостоятельности при работе над курсовым проектом (самостоятельность изложения и обобщения материала, самостоятельная интерпретация полученных результатов, обоснованность выводов)

5. Оценка оформления проекта в соответствии с требованиями, содержащимися в Методических указаниях по выполнению курсового проекта, разработанных и утвержденных кафедрой

6. Замечания по подготовке и выполнению курсового проекта

7. Курсовой проект соответствует предъявляемым требованиям и может быть рекомендован к защите

8. Оценка _____

« _____ » _____ 202__ г.

(подпись руководителя)

/ _____
расшифровка подписи