

Министерство образования и науки Украины

Типовая программа, методические указания  
к контрольной работе  
по курсу «Проектирование трансформаторов»  
для студентов специальности 7.092206.01  
«Электрические машины и аппараты»  
заочной формы обучения

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом НТУ «ХПИ»  
Протокол № 4 от 15.12.2000 г.

Харьков НТУ «ХПИ» 2001

Министерство образования и науки Украины  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»

До друку дозволяю

Ректор проф. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л.

У світ дозволяю

Ректор проф. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л.

Типовая программа, методические указания  
к контрольной работе  
по курсу «Проектирование трансформаторов»  
для студентов специальности 7.092206.01  
«Электрические машины и аппараты»

Харьков 2001

Типова програма, методичні вказівки до контрольної роботи з курсу  
«Проектування трансформаторів» для студентів спеціальності 7.092206.01  
«Електричні машини й апарати» заочної форми навчання / Укладач  
Л.П.Галайко. - Харків: НТУ «ХПІ», 2001. - 18 с. - Рос. мовою.

Укладач: Л.П.Галайко

Рецензент: А.Г.Мірошніченко

Кафедра електричних машин

Целью изучения данной дисциплины является получение теоретических и практических знаний принципов и методов проектирования трансформаторов.

Задачей изучения дисциплины является приобретение практических навыков расчета трансформаторов, умения использовать в расчетах современные вычислительные средства.

В результате изучения курса студенты должны ясно представлять себе основные задачи развития трансформаторостроения и его неразрывную связь с развитием промышленности

Теоретической базой курса являются дисциплины: теоретические основы электротехники, электроматериаловедение, электрические машины, термодинамика и теплопередача.

Курс является базовым в подготовке инженеров-электромехаников по специальности 7.092206.01.

## **1 Общие указания**

В соответствии с учебным планом курс «Проектирование трансформаторов» изучается в 11 семестре. Предусмотрено прослушивание лекций (20 ч.) и выполнение контрольной работы, а также самостоятельная работа над учебниками и учебными пособиями.

При самостоятельной работе необходимо составить краткий конспект изученного материала и ответить на вопросы для самопроверки. При работе над материалом курса следует пользоваться рекомендованными в конце данного пособия источниками (раздел 5).

После изучения курса и проверки его усвоения путем ответов на вопросы для самопроверки рекомендуется выполнить контрольную работу.

## **2 Программа курса**

### **2.1 Введение**

Требования, предъявляемые к силовым трансформаторам основной и распределительной сети. Требования, предъявляемые к силовым трансформаторам малой мощности.

### **2.2 Общие вопросы проектирования силовых трансформаторов распределительной сети**

Исходные данные для расчета и критерий оптимальности для единичного трансформатора, входящего в известную серию, и для трансформатора новой серии. Соотношения в геометрически подобных трансформаторах. Формула Петрова. Обобщенный метод проектирования. Особенности проектирования серии трансформаторов. Системы автоматизированного проектирования трансформаторов. Стандартизация в трансформаторостроении.

### Вопросы для самопроверки

1. Назовите критерии оптимальности для единичного трансформатора известной серии и для трансформатора новой серии.
2. Назовите составляющие приведенных годовых затрат и объясните, как они зависят от электромагнитных нагрузок трансформатора.
3. Объясните, почему выгодно увеличивать мощность единичного трансформатора?
4. Какие проблемы возникают при увеличении мощности трансформатора?
5. Объясните суть обобщенного метода проектирования.
6. В чем отличие схемы проектирования серии трансформаторов и единичного трансформатора известной серии?
7. Перечислите основные группы стандартов.
8. Основное назначение систем автоматизированного проектирования трансформаторов.

2.3 Выбор конструкции, материалов магнитопровода, обмоток, изоляции, выбор электромагнитных нагрузок и проектирование обмоток трансформаторов распределительной сети.

Выбор материала магнитопровода. Выбор схемы, конструкции и технологии изготовления магнитной системы. Выбор материала обмоток. Особенности проектирования трансформатора с алюминиевыми обмотками. Выбор типа обмоток. Выбор главной и продольной изоляции. Направление усовершенствования изоляции. Выбор электромагнитных нагрузок (магнитной индукции в стрержне и плотности тока в обмотках). Проектирование обмоток. Основные принципы проектирования. Раскладка цилиндрических, винтовых и спиральных обмоток.

### Вопросы для самопроверки

1. В чем преимущества пространственных магнитопроводов по сравнению с плоскими?
2. Сравните свойства холоднокатанной и горячекатанной стали.
3. Назовите рациональный способ замены медного провода на алюминиевый.
4. Перечислите преимущества и недостатки цилиндрических, винтовых и спиральных обмоток.
5. Назовите принципы конструирования главной изоляции и основные ее конструктивные исполнения.
6. Назовите критерии выбора электромагнитных нагрузок при проектировании единичного трансформатора известной серии и при проектировании новой серии.
7. Принципы проектирования продольной изоляции.

8. Перечислите основные принципы проектирования обмоток.
9. Нарисуйте схему раскладки цилиндрических обмоток из прямоугольного провода.
10. Нарисуйте схему раскладки винтовых обмоток без радиальных каналов и с радиальными каналами.
11. Нарисуйте схему раскладки непрерывных спиральных обмоток.

#### 2.4 Поверочный расчет трансформаторов распределительной сети

Расчет напряжения и потерь короткого замыкания. Добавочные потери короткого замыкания и способы их снижения. Расчет электромагнитных сил в режиме аварийного короткого замыкания. Меры по уменьшению электромагнитных сил и по увеличению механической прочности обмоток. Определение температуры обмоток в режиме аварийного короткого замыкания. Расчет потерь и тока холостого хода. Тепловой расчет трансформатора.

#### Вопросы для самопроверки

1. Объясните, каким образом напряжение короткого замыкания зависит от размеров обмоток и их взаимного расположения?
2. Объясните, что такое основные и добавочные потери короткого замыкания?
3. От чего зависят добавочные потери короткого замыкания и каким образом их снижают?
4. Нарисуйте картину действия радиальных и осевых сил при равномерном и неравномерном распределении МДС по высоте обмоток.
5. Напишите формулы для расчета величины средних электромагнитных сил в режиме аварийного КЗ.
6. Перечислите меры по уменьшению сил и усилению механической прочности обмоток.
7. Каким образом рассчитывают температуру обмоток в режиме аварийного КЗ?
8. Объясните, каким образом учитывают влияние конструкции и технологии изготовления магнитопроводов (плоских и пространственных) при расчете потерь и тока холостого хода?
9. Как изменится величина потерь и тока холостого хода при увеличении числа ступеней стржня и ярма?
10. Перечислите меры по уменьшению потерь и тока холостого хода.
11. Объясните порядок теплового расчета трансформатора.
12. Нарисуйте картину распределения температуры по сечению трансформатора.

## 2.5 Общие вопросы проектирования силовых трансформаторов малой мощности

Основное расчетное уравнение трансформатора малой мощности. Аналитические зависимости мощности трансформатора от его геометрических размеров при заданном падении напряжения и при заданном превышении температуры. Оптимальные геометрические соотношения в трансформаторах с ограниченным падением напряжения и с ограниченным превышением температуры. Ряды магнитопроводов. Метод электротепловых аналогий. Определение тепловых сопротивлений тепловой схемы замещения трансформатора. Распределение тепловых потоков в трансформаторе. Порядок расчета превышения температуры обмоток трансформатора.

### Вопросы для самопроверки

1. Запишите основное расчетное уравнение трансформатора малой мощности.
2. Запишите оптимальные геометрические соотношения в трансформаторах с ограниченным падением напряжения и с ограниченным превышением температуры для различных критериев (минимальной массы, минимального объема, минимальных потерь).
3. Объясните, что такое ряды магнитопроводов?
4. Объясните метод электротепловых аналогий.
5. Нарисуйте распределение тепловых потоков в трансформаторе для различных вариантов размещения наиболее нагретой точки.
6. Объясните порядок расчета превышения температуры обмоток трансформатора в зависимости от распределения тепловых потоков.

## 2.6 Методика проектирования силовых трансформаторов малой мощности

Особенности расчета трансформатора малой мощности. Определение магнитных и электрических нагрузок. Выбор магнитопровода. Определение магнитных потерь и тока холостого хода. Расчет обмоток. Определение падения напряжения и КПД трансформатора. Особенности выпрямительных трансформаторов.

### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные особенности расчета трансформатора малой мощности по сравнению с силовым трансформатором распределительной сети.
2. Объясните порядок расчета трансформатора малой мощности при заданном превышении температуры и при заданном падении напряжения.
3. По какому параметру выбирают типоразмер магнитопровода?

4. Объясните метод расчета индуктивных сопротивлений обмоток трансформатора малой мощности.

5. Каким образом рассчитывают эффективное значение токов и напряжений в выпрямительных трансформаторах?

### **3 Контрольная работа**

#### **Расчет трехфазного двухобмоточного масляного трансформатора распределительной сети**

Индивидуальные исходные данные для расчета трансформатора приведены далее в таблице. Вариант выбирается соответственно номеру в списке группы. Исходные данные, общие для всех вариантов: 1) нагрузка - длительная; 2) материал обмоток - алюминий; 3) конструктивная схема трансформатора - трехстержневой с concentрическими обмотками; 4) материал магнитопровода - рулонная холоднокатанная электротехническая сталь марки 3405 толщиной 0,3 мм; 5) способ регулирования напряжения - ПБВ; 6) частота  $f=50$  Гц.

По приведенным исходным данным необходимо выполнить следующее:

- 1) рассчитать основные электрические величины и произвести выбор главной изоляции;
- 2) определить основные размеры трансформатора;
- 3) рассчитать обмотку низкого напряжения (НН);
- 4) рассчитать обмотку высокого напряжения (ВН);
- 5) рассчитать характеристику короткого замыкания.

Для расчета необходимо использовать «Методические указания к курсовому проекту по расчету силовых трансформаторов для студентов электромашиностроительного и электроэнергетического факультетов» [2, разделы 1-6]. Расчет можно также провести с помощью ЭВМ на кафедре электрических машин НТУ «ХПИ». В 4 разделе приведено описание примера расчета трансформатора.

Контрольная работа выполняется в отдельной тетради. Рядом с текстом необходимо оставить поля шириной 3 см для заметок преподавателя. Рисунки рекомендуется выполнять на миллиметровой бумаге или непосредственно в тетради в соответствии с требованиями ЕСКД. В заключение необходимо привести перечень использованных источников.

Замечания рецензента не допускается стирать или заклеивать. Вместе с исправленной работой необходимо представить первоначальный вариант со всеми замечаниями рецензента. При небольших исправлениях отдельных замечаний разрешается вклеивать листы с исправленным текстом.



Таблица - Исходные данные для расчета трансформаторов

| № вар. | Номинальная мощность $S$ , кВ·А | Номинальные напряжения, кВ |                  | Потери, Вт           |                           | Напряжение короткого замыкания $U_k$ , % | Ток холостого хода $I_0$ , % | Схема и группа соединения |
|--------|---------------------------------|----------------------------|------------------|----------------------|---------------------------|--|------------------------------|---------------------------|
|        |                                 | обмотки ВН $U_2$           | обмотки НН $U_1$ | холостого хода $P_x$ | короткого замыкания $P_k$ |  |                              |                           |
| 1      | 25                              | 10±5%                      | 0,4              | 130                  | 600                       | 4,5                                      | 3,2                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |
| 2      | 40                              | 10±5%                      | 0,4              | 175                  | 880                       | 4,5                                      | 3,0                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |
| 3      | 63                              | 10±5%                      | 0,23             | 240                  | 1280                      | 4,5                                      | 2,8                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |
| 4      | 100                             | 10±5%                      | 0,23             | 330                  | 1970                      | 4,5                                      | 2,6                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |
| 5      | 100                             | 35±5%                      | 0,4              | 420                  | 1970                      | 6,5                                      | 2,6                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |
| 6      | 100                             | 10±5%                      | 0,4              | 330                  | 1970                      | 4,5                                      | 2,6                          | Δ/Y <sub>H</sub> -0       |
| 7      | 160                             | 10±5%                      | 0,23             | 510                  | 2650                      | 4,5                                      | 2,4                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |
| 8      | 160                             | 35±5%                      | 0,4              | 620                  | 2650                      | 6,5                                      | 2,4                          | Δ/Y <sub>H</sub> -0       |
| 9      | 160                             | 10±5%                      | 0,4              | 510                  | 2650                      | 4,5                                      | 2,4                          | Δ/Y <sub>H</sub> -0       |
| 10     | 250                             | 10±5%                      | 0,4              | 740                  | 3700                      | 4,5                                      | 2,3                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |
| 11     | 250                             | 35±5%                      | 0,69             | 900                  | 3700                      | 6,5                                      | 2,3                          | Δ/Y <sub>H</sub> -11      |
| 12     | 400                             | 10±5%                      | 0,69             | 950                  | 5500                      | 4,5                                      | 2,1                          | Y/Δ-11                    |
| 13     | 400                             | 35±5%                      | 0,4              | 1200                 | 5500                      | 6,5                                      | 2,1                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |
| 14     | 630                             | 10±5%                      | 0,69             | 1310                 | 7600                      | 5,5                                      | 2,0                          | Y/Δ-11                    |
| 15     | 630                             | 35±5%                      | 0,69             | 1600                 | 7600                      | 6,5                                      | 2,0                          | Y/Y <sub>H</sub> -0       |

#### 4 Пример расчета

##### 4.1 Исходные данные для расчета трансформатора:

|   |                     |
|---|---------------------|
| номинальная мощность  | $S=100$ кВ·А;       |
| номинальное линейное напряжение обмотки высокого напряжения | $U_2=10\pm 5\%$ кВ; |
| номинальное линейное напряжение обмотки низкого напряжения  | $U_1=0,4$ кВ;       |
| потери холостого хода                                       | $P_x=330$ Вт;       |
| потери короткого замыкания                                  | $P_k=1970$ Вт;      |
| напряжение короткого замыкания                              | $U_k=4,5\%$ ;       |
| ток холостого хода  | $I_0=2,6\%$ ;       |

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| схема и группа соединения           | Y/Y <sub>н</sub> -0;                               |
| материал обмоток                    | Al;  |
| конструктивная схема трансформатора | трехстержневой с<br>концентрическими<br>обмотками; |
| материал магнитопровода             | сталь марки 3405<br>толщиной 0,3 мм.               |

#### 4.2 Расчет основных электрических величин и выбор главной изоляции

Мощность одной фазы трансформатора

$$S_{\phi} = \frac{S}{3} = \frac{100}{3} = 33,3 \text{ кВ}\cdot\text{А.}$$

Мощность на одном стержне

$$S' = \frac{S}{3} = \frac{100}{3} = 33,3 \text{ кВ}\cdot\text{А.}$$

Номинальный линейный ток обмотки ВН

$$I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5,773 \text{ А.}$$

Номинальный линейный ток обмотки НН

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 144,3 \text{ А.}$$

Фазный ток обмотки НН при соединении обмотки в звезду

$$I_{\phi 1} = I_1 = 144,3 \text{ А.}$$

Фазный ток обмотки ВН при соединении обмотки в звезду

$$I_{\phi 2} = I_2 = 5,773 \text{ А.}$$

Фазное напряжение обмотки НН при соединении в звезду

$$U_{\phi 1} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,231 \text{ кВ.}$$

Фазное напряжение обмотки ВН при соединении в звезду

$$U_{\phi 2} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,773 \text{ кВ.}$$

Испытательное напряжение обмотки ВН  $U_{исп2}$  определяется по таблице 2.1 [2] для заданного  $U_2$ . Класс напряжения 10 кВ,  $U_{исп2}=35$  кВ.

Испытательное напряжение обмотки НН  $U_{исп1}$  - по таблице 2.1 для заданного  $U_1$ . Класс напряжения 1 кВ,  $U_{исп1}=5$  кВ.

По таблице 2.2 выбираются изоляционные расстояния обмотки ВН:

$l_{02}=30$  мм;  $\delta_{ш}=0$ ;  $a_{12}=9$  мм;  $\delta_{12}=3$  мм;  $l_{ц2}=15$  мм;  $a_{22}=10$  мм.

По таблице 2.3 выбираются изоляционные расстояния обмотки НН:

$l_{01}=15$  мм;  $\delta_{01}=1$  мм;  $a_{ц1}=0$ ;  $a_{01}=4$  мм;  $l_{ц1}=0$ .

Полученные изоляционные расстояния проставляются на рисунке «Главная изоляция обмоток» (см. рис. 2.1 [2]).

#### 4.3 Определение основных размеров трансформатора.

По таблице 3.1 [2] выбираем оптимальное значение коэффициента  $\beta$ :

$$\beta=1,2.$$

Ширина приведенного канала рассеяния

$$a_p = a_{12} \cdot 10^{-3} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 9 \cdot 10^{-3} + 0,0189 = 0,0279 \text{ м},$$

где  $\frac{a_1 + a_2}{3} = \kappa \cdot \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2} = 0,7875 \cdot \sqrt[4]{33,3} \cdot 10^{-2} = 0,0189 \text{ м},$

$\kappa=0,7875$ , определяется по таблице 3.2 [2].

Коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю  $\kappa_p=0,95$ .

Реактивная составляющая напряжения КЗ

$$U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{4,5^2 - 1,97^2} = 4,04 \text{ \%}.$$

Здесь  $U_a = \frac{P_k}{10 \cdot S} = \frac{1970}{10 \cdot 100} = 1,97 \text{ \%}.$

По таблице 3.3 [2] выбираем индукцию  $B_c$

$$B_c=1,6 \text{ Тл}.$$

Коэффициент заполнения активным сечением площади круга

$$\kappa_c = \kappa_3 \cdot \kappa_{кр} = 0,96 \cdot 0,92 = 0,883,$$

где  $\kappa_3$  - коэффициент заполнения сечения стержня сталью, определяется по таблице 3.5 [2],  $\kappa_{кр}$  - коэффициент заполнения площади круга с диаметром  $d$  площадью ступенчатой фигуры, определяется по таблице 3.4 [2].

Диаметр стержня

$$d = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot a_p \cdot \beta \cdot \kappa_{кр}}{f \cdot U_p \cdot B_c^2 \cdot \kappa_c^2}} = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{33,3 \cdot 0,0279 \cdot 1,2 \cdot 0,95}{50 \cdot 4,04 \cdot 1,6^2 \cdot 0,883^2}} = 0,1147 \text{ м}.$$

Нормализованный диаметр  $d_n=0,115 \text{ м}.$

Значение  $\beta_n$ , соответствующее нормализованному диаметру,

$$\beta_n = \beta \cdot \left(\frac{d_n}{d}\right)^4 = 1,2 \cdot \left(\frac{0,115}{0,1147}\right)^4 = 1,209.$$

Средний диаметр канала между обмотками  $d_{12}$

$$\begin{aligned} d_{12} &= d_n + (2a_{01} + a_{12}) \cdot 10^{-3} + 2a_1 = \\ &= 0,115 + (2 \cdot 4 + 9) \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,0208 = 0,1736 \text{ м}, \end{aligned}$$

где  $a_1 = \kappa_1 \cdot \frac{a_1 + a_2}{3} = 1,1 \cdot 0,0189 = 0,0208 \text{ м}.$

Высота обмотки

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta_n} = \frac{\pi \cdot 0,1736}{1,209} = 0,451 \text{ м.}$$

Активное сечение стержня

$$P_c = \kappa_3 \cdot P_{\phi c} \cdot 10^{-4} = 0,96 \cdot 93,9 = 0,00901 \text{ м}^2,$$

где  $P_{\phi c}$  находится из таблицы 3,6 [2].

Электродвижущая сила одного витка

$$U_\phi = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot P_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,00901 = 3,2 \text{ В.}$$

#### 4.4 Расчет обмотки НН

Средняя плотность тока в обмотках

$$J_{\text{ср}} = \kappa \cdot \kappa_\partial \cdot \frac{P_\kappa \cdot U_\phi}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4 = 0,463 \cdot 0,93 \cdot \frac{1970 \cdot 3,2}{100 \cdot 0,1736} \cdot 10^4 = 1,63 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2,$$

где  $\kappa=0,463$  для обмоток из Al,  $\kappa_\partial$  определяется по таблице 4.1 [2].

Проверяем выполнение условия

$$J_{\text{ср}} \leq \frac{U_\kappa \cdot 10^6}{\sqrt{2}} = \frac{4,5 \cdot 10^6}{\sqrt{2}} = 3,182 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Ориентировочное сечение витка (принимаяем  $J_1=J_{\text{ср}}$ )

$$P_1' = \frac{I_{1\phi}}{J_1} = \frac{144,3}{1,63 \cdot 10^6} = 88,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 88,46 \text{ мм}^2.$$

По величине тока, сечению витка и напряжению по таблице 4.1 [2] выбираем цилиндрическую двухслойную обмотку из прямоугольного провода.

Число витков на одну фазу

$$W_1 = \frac{U_{\phi 1} \cdot 10^3}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot P_c} = \frac{0,231}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,0091} = 72,125.$$

Округляем до ближайшего целого числа:

$$W_1=72 \text{ витка.}$$

Уточняем ЭДС одного витка:

$$U_\phi = \frac{U_{\phi 1} \cdot 10^3}{W_1} = \frac{231}{72} = 3,205 \text{ В.}$$

Уточняем индукцию в стержне:

$$B_c = \frac{U_\phi}{4,44 \cdot f \cdot P_c} = \frac{3,205}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,00901} = 1,602 \text{ Тл.}$$

Число витков в одном слое

$$W_{\text{сл1}} = \frac{W_1}{2} = \frac{72}{2} = 36.$$

Ориентировочный осевой размер витка (принимаяем  $l_1=l$ )

$$h_{\text{с1}} = \frac{l_1}{W_{\text{с1}} + 1} = \frac{0,451}{36 + 1} = 0,0122 \text{ м.}$$

Определяем ориентировочный радиальный размер проводов

$$a = \frac{\Pi_1' \cdot 10^6}{h_{\text{с1}} \cdot 10^3 - 0,5} = \frac{88,46 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6}{0,0122 \cdot 10^3 - 0,5} = 7,57 \text{ мм.}$$

По таблице 4.4 [2] находим предельно допустимый радиальный размер (при котором добавочные потери не превышают 5%)  $a_{\text{пред}}=8$  мм. Ориентировочный радиальный размер проводов  $a=7,57$  мм меньше предельно допустимого, следовательно двухслойная обмотка может быть выполнена.

По таблице 4.3 [2] подбираем провод сечением  $\Pi_1' \cdot 10^6 = 88,46 \text{ мм}^2$  и высотой  $h_{\text{в1}} \cdot 10^3 - 0,5 = 0,0122 \cdot 10^3 - 0,5 = 11,7$  мм. Такого провода в таблице нет, поэтому сечение витка разбиваем на 2 параллельных провода сечением  $\frac{\Pi_1' \cdot 10^6}{2} = 44,23 \text{ мм}^2$  и высотой  $\frac{h_{\text{с1}} \cdot 10^3}{2} - 0,5 = \frac{12,2}{2} - 0,5 = 5,6$  мм. Из таблицы 4.3 [2] подбираем провод сечением  $\Pi_1'' = 43,9$  мм, высотой  $b=5,5$  мм (в таблице это размер «а», так как намотка выполняется на ребро) и шириной  $a=8$  мм (в таблице это размер «b»).

При намотке на ребро проверяем отношение радиального размера провода к осевому:

$$\frac{a}{b} = \frac{5,6}{8} = 1,43; \quad 1,3 < 1,43 < 3.$$

Записываем подобранные размеры проводов витка по форме  $n_{\text{с1}} \times \frac{a \times b}{a \times b}$ , где  $n_{\text{в1}}=2$  - число параллельных проводов,  $a', b'$  - размер провода с изоляцией:

$$2 \times \frac{8 \times 5,6}{8,5 \times 6,1}.$$

Проставляем размеры проводов на рисунке (см. рис. 4.1,а [2]).

Полное сечение витка из  $n_{\text{в1}}=2$  параллельных проводов

$$\Pi_1 = n_{\text{с1}} \cdot \Pi_1'' \cdot 10^6 = 2 \cdot 43,9 \cdot 10^{-6} = 87,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Уточняем плотность тока:

$$J_1 = \frac{I_1 \phi}{\Pi_1} = \frac{144,3}{87,8 \cdot 10^{-6}} = 1,64 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Осовой размер витка

$$h_{\text{с1}} = n_{\text{с1}} \cdot b' \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 6,1 \cdot 10^{-3} = 0,0122 \text{ м.}$$

Осовой размер обмотки

$$l_1 = h_{\text{с1}}(W_{\text{с1}} + 1) + 0,005 = 0,0122 \cdot (36 + 1) + 0,005 = 0,456 \text{ м.}$$

По рисунку 4.2,б [2] определяем ориентировочный размер металла обмотки между двумя охлаждающими каналами:  $J_1=1,64 \text{ МА/м}^2$ ;  $q=1200 \text{ Вт/м}^2$ ;  $b=28 \text{ мм}$ . Радиальный размер провода  $a=8 \text{ мм}$  меньше  $b/2=14 \text{ мм}$ , поэтому канал между слоями заменяем жесткой междуслойной изоляцией толщиной  $a_{11}=1 \text{ мм}$ .

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = (2a' + a_{11}) \cdot 10^{-3} = (2 \cdot 8,5 + 1) \cdot 10^{-3} = 0,018 \text{ м.}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки

$$q_1 = 2 \cdot \kappa \cdot \frac{b}{b'} \cdot J_1^2 \cdot 10^{-12} = 2 \cdot 24 \cdot 8 \cdot \frac{5,6}{6,1} \cdot 1,64^2 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-12} = 948 \text{ Вт/м}^2.$$

Здесь  $\kappa=24$  для алюминиевого провода.

Полученное значение  $q_1$  меньше допустимых  $1200 \div 1400 \text{ Вт/м}^2$ .

Внутренний диаметр обмотки

$$D_1' = d_n + 2 \cdot a_{01} \cdot 10^{-3} = 0,115 + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,123 \text{ м.}$$

Наружный диаметр обмотки

$$D_1'' = D_1' + 2 \cdot a_1 = 0,123 + 2 \cdot 0,018 = 0,159 \text{ м.}$$

Средний диаметр обмотки

$$D_{cp1} = (D_1' + D_1'') / 2 = (0,123 + 0,159) / 2 = 0,141 \text{ м.}$$

Масса металла обмотки

$$G_{M1} = \kappa \cdot D_{cp1} \cdot W_1 \cdot \Pi_1 \cdot 10^3 = 25,4 \cdot 0,141 \cdot 72 \cdot 87,8 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 22,64 \text{ кг.}$$

#### 4.5 Расчет обмотки ВН

Число витков при номинальном напряжении

$$W_{H2} = W_1 \cdot \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} = 72 \cdot \frac{5,773}{0,231} = 1800.$$

Число витков на 1 ступени регулирования напряжения

$$W_p = \frac{\Delta U_{\phi}}{U_{\phi}} \cdot 10^3 = \frac{289,5}{3,2} = 90,$$

где  $\Delta U_{\phi} = 5\% \cdot U_{\phi 2} = 0,05 \cdot 5773 = 289,5 \text{ В}$ .

Число витков обмотки на ответвлениях:

верхняя ступень  $W_2 = W_{H2} + W_p = 1800 + 90 = 1890$  витков;

при номинальном напряжении  $W_{H2} = 1800$  витков;

нижняя ступень  $W_{H2} - W_p = 1710$  витков.

Плотность тока в обмотке ВН

$$J_2 = 2 \cdot J_{cp} - J_1 = 2 \cdot 1,63 \cdot 10^6 - 1,64 \cdot 10^6 = 1,62 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Сечение витка обмотки ВН

$$П_2' = \frac{I_{\phi 2}}{J_2 \cdot 10^{-6}} = \frac{5,773}{1,62} = 3,56 \text{ мм}^2.$$

Выбираем по таблице 4.2 [2] цилиндрическую обмотку из круглого провода.

По сечению  $П_2'$  и сортаменту обмоточного провода (таблица 5.1 [2]) подбираем провод диаметром  $d_2=2,12$  мм. Записываем выбранный провод по форме:

$$\text{марка провода } n_{\phi 2} \cdot \frac{d_2}{d_2'}$$

Здесь  $n_{\phi 2}$  - число параллельных проводов,  $d_2'$  - диаметр провода с изоляцией.

$$\text{АПБ } 1 \cdot \frac{2,12}{2,52}, \text{ сечение провода } П_2'=3,53 \text{ мм}^2.$$

Полное сечение витка,  $\text{м}^2$ :

$$П_2 = n_{\phi 2} \cdot П_2'' \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 3,53 \cdot 10^{-6} = 3,53 \cdot 10^{-6}.$$

Уточняем плотность тока:

$$J_2 = \frac{I_{\phi 2}}{П_2} = \frac{5,773}{3,53 \cdot 10^{-6}} = 1,635 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Число витков в слое

$$W_{\text{сл}2} = \frac{l_2 \cdot 10^3}{n_{\phi 2} \cdot d_2'} - 1 = \frac{0,456 \cdot 10^3}{1 \cdot 2,52} - 1 = 180.$$

Здесь  $l_2=l_1$ .

Число слоев в обмотке

$$n_{\text{сл}2} = \frac{W_2}{W_{\text{сл}2}} = \frac{1890}{180} = 10,5.$$

Округляем:  $n_{\text{сл}2}=11$ .

Рабочее напряжение двух слоев

$$U_{\text{м сл}} = 2 \cdot W_{\text{сл}2} \cdot U_{\phi} = 2 \cdot 180 \cdot 3,2 = 1150 \text{ В}.$$

По таблице 5.2 [2] выбираем междуслойную изоляцию из 3-х слоев кабельной бумаги общей толщиной  $\delta_{\text{м сл}}=0,36$  мм. Определяем радиальный размер обмотки  $a_2$ . Обмотку выполняем в виде двух концентрических катушек с осевым масляным каналом между ними. Ширину канала  $a_{22}'$  выбираем по таблице 4.5 [2] для вертикального канала длиной  $l_2=456$  мм. Она составляет 6 мм.

$$a_2 = \left( d_2' \cdot n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{м сл}} \cdot (n_{\text{сл}2} - 1) + a_{22}' \right) \cdot 10^{-3} = \\ (2,52 \cdot 11 + 0,36(11 - 1) + 6) \cdot 10^{-3} = 0,03696 \text{ м}.$$

Выбираем схему регулирования по рис. 5.1,а [2].

Внутренний диаметр обмотки

$$D_2' = D_1'' + 2 \cdot a_{12} \cdot 10^{-3} = 0,159 + 2 \cdot 9 \cdot 10^{-3} = 0,177 \text{ м.}$$

Наружный диаметр обмотки без экрана

$$D_2'' = D_2' + 2 \cdot a_2 = 0,177 + 2 \cdot 0,03696 = 0,2509 \text{ м.}$$

Средний диаметр обмотки

$$D_{2\text{ср}} = \frac{D_2' + D_2''}{2} = \frac{0,177 + 0,2509}{2} = 0,2139 \text{ м.}$$

Поверхность охлаждения обмотки

$$P_{02} = 2,4 \cdot n \cdot \pi \cdot (D_2' + D_2'') \cdot l_2 = 2,4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (0,177 + 0,2509) \cdot 0,456 = 2,95 \text{ м}^2.$$

Здесь  $n=2$  - число катушек в обмотке.

Ориентировочное значение плотности теплового потока

$$q_2 \approx \frac{P_k}{2 \cdot P_{02}} = \frac{1970}{2 \cdot 2,95} = 334 \text{ Вт/м}^2,$$

где  $q_2$  меньше допустимых  $1200 \div 1400 \text{ Вт/м}^2$ .

Масса металла обмотки

$$G_{M2} = \kappa \cdot D_{\text{ср}} \cdot W_{H2} \cdot P_2 \cdot 10^3 = 25,4 \cdot 0,2139 \cdot 1800 \cdot 3,53 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 34,53 \text{ кг.}$$

Средний диаметр канала между обмотками НН и ВН

$$d_{12} = D_1'' + a_{12} \cdot 10^{-3} = 0,159 + 9 \cdot 10^{-3} = 0,168 \text{ м.}$$

Для рассчитанных обмоток НН и ВН рисуем эскиз (смотри рис. 5.4 в [2]).

4.6 Расчет характеристик короткого замыкания

4.6.1 Определение потерь короткого замыкания

Основные потери в обмотке низкого напряжения

$$P_{\text{осн1}} = \kappa \cdot J_1^2 \cdot G_{M1} \cdot 10^{-12} = 12,75 \cdot (1,64 \cdot 10^6)^2 \cdot 22,64 \cdot 10^{-12} = 780,12 \text{ Вт.}$$

Основные потери в обмотке высокого напряжения

$$P_{\text{осн2}} = \kappa \cdot J_2^2 \cdot G_{M2} \cdot 10^{-12} = 12,75 \cdot (1,635 \cdot 10^6)^2 \cdot 34,53 \cdot 10^{-12} = 1177,75 \text{ Вт.}$$

Коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотке НН,

$$\kappa_{\partial 1} = 1 + \kappa_1 \cdot \beta_1^2 \cdot a^4 \cdot n_1^2 \cdot 10^8 = 1 + 0,037 \cdot 0,839^2 \cdot (8 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 2^2 \cdot 10^8 = 1,043;$$

$$\beta_1 = \frac{b_1 \cdot m_1}{l_1} \cdot \kappa_p = \frac{5,6 \cdot 10^{-3} \cdot 72}{0,456} \cdot 0,95 = 0,839;$$

$$m_1 = W_{\text{сл1}} \cdot n_{\text{с1}} = 36 \cdot 2 = 72.$$

Коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотке ВН,



$$\kappa_{\partial 2} = 1 + \kappa_2 \cdot \beta_2'^2 \cdot d_2^4 \cdot n_2^2 \cdot 10^8 = 1 + 0,017 \cdot 0,794^2 \cdot (2,12 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 11^2 \cdot 10^8 = 1,00262;$$

$$\beta_2' = \frac{d_2 \cdot m_1}{l_2} \cdot \kappa_p = \frac{2,12 \cdot 10^{-3} \cdot 180}{0,456} \cdot 0,95 = 0,794;$$

$$m_2 = W_{\text{сл}2} \cdot n_{\text{в}2} = 180 \cdot 1 = 180.$$

Масса металла проводов отводов обмотки НН

$$G_{\text{ом}1} = l_{\text{ом}1} \cdot \Pi_1 \cdot \gamma = 3,42 \cdot 87,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 0,838 \text{ кг};$$

$$l_{\text{ом}1} = 7,5 \cdot l_1 = 7,5 \cdot 0,456 = 3,42 \text{ м.}$$

Основные потери в отводах обмотки НН

$$P_{\text{ом}1} = \kappa \cdot J_1^2 \cdot G_{\text{ом}1} \cdot 10^{-12} = 12,75 \cdot (1,64 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,838 \cdot 10^{-12} = 28,75 \text{ Вт.}$$

Масса металла проводов отводов обмотки ВН

$$G_{\text{ом}2} = l_{\text{ом}2} \cdot \Pi_2 \cdot \gamma = 3,42 \cdot 3,53 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 0,0326 \text{ кг};$$

$$l_{\text{ом}2} = 7,5 \cdot l_2 = 7,5 \cdot 0,456 = 3,42 \text{ м.}$$

Основные потери в отводах обмотки ВН

$$P_{\text{ом}2} = \kappa \cdot J_2^2 \cdot G_{\text{ом}2} \cdot 10^{-12} = 12,75 \cdot (1,635 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,0326 \cdot 10^{-12} = 1,11 \text{ Вт.}$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкции

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

Полные потери КЗ

$$P_k = P_{\text{осн}1} \cdot \kappa_{\partial 1} + P_{\text{осн}2} \cdot \kappa_{\partial 2} + P_{\text{ом}1} + P_{\text{ом}2} + P_{\sigma} =$$

$$= 780,12 \cdot 1,043 + 1177,75 \cdot 1,00262 + 28,75 + 1,11 + 15 = 2038,61 \text{ Вт};$$

$$\frac{P_k}{P_{k \text{ исх}}} \cdot 100 = \frac{2038,61}{1970} \cdot 100 = 103,1\% < 105\%.$$

#### 4.6.2 Определение напряжения КЗ

Активная составляющая напряжения КЗ

$$U_a = \frac{P_k}{10 \cdot S} = \frac{2038,61}{10 \cdot 100} = 2,038 \text{ \%}.$$

Уточняем значение коэффициента  $\beta$ :

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l} = \frac{\pi \cdot 0,168}{0,456} = 1,157.$$

Уточняем ширину приведенного канала рассеяния:

$$a_p = \frac{a'_{12} + (a_1 + a_2)}{3} = \frac{9 \cdot 10^{-3} + (0,018 + 0,03696)}{3} = 0,02732.$$

Для обмотки ВН без экрана  $a'_{12} = a_{12} \cdot 10^{-3} = 9 \cdot 10^{-3}$ .

Уточняем коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному:

$$\kappa_p = 1 - \sigma \cdot (1 - e^{-1/\sigma}) = 1 - 0,0447 \cdot (1 - e^{-1/0,0447}) = 0,9553;$$

$$\sigma = \frac{a'_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l} = \frac{9 \cdot 10^{-3} + 0,018 + 0,03696}{\pi \cdot 0,456} = 0,0447.$$

Реактивная составляющая напряжения КЗ

$$U_p = \frac{7,92 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot \kappa_p}{U_g^2} \cdot 10^{-1} =$$

$$= \frac{7,92 \cdot 50 \cdot 33,3 \cdot 1,157 \cdot 0,02732 \cdot 0,9553}{3,2^2} = 3,89\%.$$

Напряжение КЗ

$$U_k = \sqrt{U_p^2 + U_a^2} = \sqrt{3,89^2 + 2,038^2} = 4,39\%.$$

Значение  $\frac{U_k}{U_{k \text{ исх}}} \cdot 100 = \frac{4,39}{4,5} \cdot 100 = 97,5\%$  находится в допустимых

пределах 95÷105%.

4.6.3 Расчет механических сил в обмотках

Установившийся ток КЗ обмотки ВН

$$I_{кз} = \frac{I_{\phi 2} \cdot 100}{U_k} = \frac{5,773 \cdot 100}{4,39} = 131,7 \text{ А.}$$

Мгновенное максимальное значение тока КЗ обмотки ВН

$$i_{км} = 1,41 \cdot \kappa_m \cdot I_{кз} = 1,41 \cdot 1,193 \cdot 131,7 = 223 \text{ А;}$$

$$\kappa_m = 1 + e^{-\pi U_a / U_p} = 1 + e^{-\pi \cdot 2,038 / 3,89} = 1,193.$$

Радиальная сила, действующая на обмотку ВН,

$$F_p = 0,628 \cdot (i_{км} \cdot W_{н2})^2 \cdot \beta \cdot \kappa_p =$$

$$= 0,628 \cdot (223 \cdot 1800)^2 \cdot 1,157 \cdot 0,9553 \cdot 10^{-6} = 112000 \text{ Н.}$$

Растягивающее напряжение в проводе обмотки ВН

$$\sigma_p = \frac{F_p}{2 \pi \cdot W_{н2} \cdot \Pi_2} \cdot 10^{-6} = \frac{112000 \cdot 10^{-6}}{2 \pi \cdot 1800 \cdot 3,53 \cdot 10^{-6}} = 2,8 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_p = 2,8 \text{ МПа} < \sigma_{p \text{ доп}} = 25 \text{ МПа.}$$

Напряжение сжатия от радиальных сил в проводе обмотки НН

$$\sigma_{сж \text{ рад}} = \frac{F_p}{2 \pi \cdot W_1 \cdot \Pi_1} \cdot 10^{-6} = \frac{112000 \cdot 10^{-6}}{2 \pi \cdot 72 \cdot 87,8 \cdot 10^{-6}} = 2,82 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{сж \text{ рад}} < \sigma_{доп} = 15 \text{ МПа.}$$

Осевые силы, обусловленные конечным соотношением высоты и ширины обмоток,

$$F'_{oc} = \frac{F_p \cdot a_p}{2 \cdot l_2} = \frac{112000 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0232}{2 \cdot 0,456} = 3355 \text{ Н.}$$

Максимальные сжимающие силы по рис. 6.4,а [2] в середине высоты обмотки ВН и НН

$$F_{сж2} = F_{сж1} = F'_{oc} = 3355 \text{ Н.}$$

Наибольшее напряжение сжатия наблюдается в середине высоты обмотки НН в изоляции витков:

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{сж1} \cdot 10^{-6}}{n_{сл} \cdot a_1 \cdot \pi \cdot D_{ср1}} = \frac{3355 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 0,141} = 0,474 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{сж} < \sigma_{доп} = 18 \text{ МПа.}$$

4.6.4 Температура обмотки ВН через 4 с после возникновения короткого замыкания

$$\vartheta_k = \frac{2680}{k \cdot \left( \frac{U_k}{J_2 \cdot 10^{-6}} \right)^2 - 5} + 90 = \frac{2680}{5,5 \cdot \left( \frac{4,39}{1,635} \right)^2 - 5} + 90 = 167,5^\circ.$$

$$\vartheta_k < \vartheta_{доп} = 200^\circ \text{С.}$$

#### Список рекомендуемой литературы

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Методические указания к курсовому проекту по расчету силовых трансформаторов для студентов электромашиностроительного и электроэнергетического факультетов. - Харьков, ХПИ, 1992.
3. Сергеенков П.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. - М.: Высш. шк., 1989.
4. Петров Г.Н. Электрические машины. Ч. 1. - М.: Энергия, 1974.
5. Автоматизированное проектирование электрических машин / Под ред. проф. Ю.Б.Бородулина. - М.: Высш. шк., 1989.
7. Белополюский И.И., Каретникова Г.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. - М.: Энергия, 1973.

Навчальне видання

Типова програма, методичні вказівки  
до контрольної роботи з курсу  
«Проектування трансформаторів»  
для студентів спеціальності 7.092206.01  
«Електричні машини й апарати» заочної форми навчання  
Російською мовою

Укладач: ГАЛАЙКО Лідія Петрівна

Відповідальний за випуск В.М.Іваненко

Роботу рекомендував до видання В.І.Мілих

Редактор Л.Л.Яковлева  
Комп'ютерна верстка І.А.Черняєва

Свідоцтво про реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000

План 2001 р., п. 38/11-01

Підписано до друку 24.05.2001. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папір офсетний. Друк - ризографія. Гарнітура Таймс.  
Ум. друк. арк. 1. Обл.-вид. арк. 1,2. Тираж - 50 прим.  
Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Друкарня НТУ «ХПІ», Харків, вул. Фрунзе, 21