

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

Кафедра: «Эксплуатации энергетического
оборудования и электрические машины»
Дисциплина: «Основы технической
диагностики и безопасной эксплуатации
электрооборудования АПК»
35.04.06 «Агроинженерия»
Электрооборудование и электротехнологии

ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ РЕМОНТА

Учебное пособие по выполнению курсовой работы

Утверждено на заседании кафедры
ЭЭО и ЭМ.
Протокол № 2 от 2.09.2019 г.

Рекомендовано к изданию
методическим советом
Энергетического факультета.
Протокол № 1 от 24.09.2019 г.

Зерноград - 2019

© П.В. Гуляев., М.М. Украинцев.,
П.Т. Корчагин., А.С. Татаринцев., 2019
© Азово-Черноморский инженерный
институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2019

*Об издании – [1](#), [2](#)
[Содержание](#)*

УДК 621.3

*Публикуется по решению методического совета
энергетического факультета
Азово-Черноморского инженерного института – филиала
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донской государственной аграрный университет»
в г. Зернограде*

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент **Головин В.В.**

Диагностика силовых трансформаторов в процессе ремонта [Электронный ресурс]: учебное пособие по выполнению курсовой работы / П.В. Гуляев, М.М. Украинцев, П.Т. Корчагин, А.С. Татаринцев. – Электрон. дан. - Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО ДГАУ, 2019. – 56 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

В учебном пособии приведена методика диагностики силовых трансформаторов в процессе ремонта.

Данные методические указания могут быть использованы студентами при изучении курса эксплуатации электрооборудования, эксплуатации электрических установок и инженерно-техническими работниками в их практической деятельности, связанной с ремонтом силовых трансформаторов.

© П.В. Гуляев., М.М. Украинцев.,
П.Т. Корчагин., А.С. Татаринцев., 2019
© Азово-Черноморский инженерный
институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2019

Содержание		стр.
	<u>Цель и задачи курсовой работы</u>	5
	<u>Порядок выполнения курсовой работы</u>	5
1.	<u>Задание к курсовой работе</u>	6
2.	<u>Определение обмоточных данных трансформатора</u>	8
2.1	<u>Определение сечения и диаметра стержня магнитопровода трансформатора</u>	8
2.2	<u>Расчет числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора</u>	8
2.3	<u>Расчет сечения обмоточного провода для первичной и вторичной обмоток с определением стандартных значений для принятой марки провода</u>	10
3.	<u>Расчет значения номинального фазного тока</u>	12
4.	<u>Определение ориентировочного значения полной номинальной мощности трансформатора</u>	12
5.	<u>Расчет конструктивных размеров обмоток высокого и низкого напряжений</u>	13
6.	<u>Проверка правильности размещения обмоток в окне сердечника трансформатора</u>	15
7.	<u>Определение параметров трансформатора</u>	15
7.1	<u>Расчет массы обмоток высокого и низкого напряжений</u>	15
7.2	<u>Определение потерь короткого замыкания в трансформаторе</u>	16
7.3	<u>Определение потерь мощности холостого хода в трансформаторе</u>	17
7.4	<u>Определение коэффициента полезного действия трансформатора</u>	18
7.5	<u>Определение величины тока холостого хода и его активной и реактивной составляющих</u>	18
8.	<u>Проверка удельной тепловой нагрузки</u>	19
9.	<u>Расчет эксплуатационных показателей трансформатора</u>	21
9.1	<u>Изменение вторичного напряжения на зажимах трансформатора</u>	21
9.1.1	<u>Расчётный метод определения изменения вторичного напряжения</u>	21
9.1.2	<u>Пример расчета $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$</u>	22
9.1.3.	<u>Построение упрощенной векторной диаграммы для определения изменения вторичного напряжения</u>	23
9.2	<u>Изменение коэффициента полезного действия</u>	25
10	<u>Краткие теоретические сведения для выполнения индивидуальных проектных заданий по диагностике и испытаниям трансформатора</u>	26
10.1	<u>Профилактические испытания</u>	26
10.1.1	<u>Профилактические испытания – термины и определения</u>	26

<u>10.1.2 Профилактические испытания трансформаторов</u>	28
<u>10.2 Диагностирование изоляции электрооборудования</u>	33
<u>10.2.1 Общие положения и правила измерения сопротивления изоляции</u>	33
<u>10.2.2 Учет температуры при измерении сопротивления изоляции</u>	34
<u>10.2.3 Схемы замещения электрической изоляции электроустановок</u>	35
<u>10.2.4 Способы определения степени увлажнения изоляции</u>	41
<u>10.2.5 Испытание изоляции повышенным напряжением переменного тока</u>	44
<u>10.2.6 Прогнозирование технического состояния оборудования по результатам измерения сопротивления изоляции</u>	45
<u>Выводы</u>	47
<u>Литература</u>	47
<u>Приложения</u>	48

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Цель курсовой работы – научить студентов определять эксплуатационные показатели трансформатора по известным размерам сердечника.

Задачи курсовой работы – научить студентов проводить электротехнические и проверочные расчеты при капитальном ремонте электроэнергетического оборудования.

Нормируемый эксплуатационный срок службы трансформаторов составляет 20 лет. За этот период часть конструктивных элементов трансформатора изнашивается и выходит из строя. Такие трансформаторы подлежат капитальному ремонту на специализированных ремонтных предприятиях. В процессе ремонта, посредством расчетов проверяют эксплуатационные показатели трансформатора. Эти показатели зависят от конструктивных параметров трансформатора, таких как, число витков на фазу, размер обмоток, диаметра проводника и других, которые определяются размерами сердечника. Эксплуатационные показатели в процессе капитального ремонта должны остаться в допустимых пределах.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Введение

1. Задание к курсовой работе.
2. Определение обмоточных данных трансформатора:
 - 2.1. Определение сечения и диаметра стержня магнитопровода трансформатора.
 - 2.2. Расчет числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора.
 - 2.3. Расчет сечения обмоточного провода для первичной и вторичной обмоток с определением стандартных значений для принятой марки провода.
3. Расчет значения номинального фазного тока.
4. Определение ориентировочного значения полной номинальной мощности трансформатора.
5. Расчет конструктивных размеров обмоток высокого и низкого напряжений.
6. Проверка правильности размещения обмоток в окне сердечника трансформатора.
7. Определение параметров трансформатора:
 - 7.1. Расчет массы обмоток высокого и низкого напряжений.
 - 7.2. Определение потерь короткого замыкания в трансформаторе.
 - 7.3. Определение потерь мощности холостого хода в трансформаторе.
 - 7.4. Определение коэффициента полезного действия трансформатора.

- 7.5. Определение величины тока холостого хода и его активной и реактивной составляющих.
8. Проверка удельной тепловой нагрузки.
9. Расчет эксплуатационных показателей трансформатора:
- 9.1. Построение упрощенной векторной диаграммы.
 - 9.2. Анализ зависимости $U_2=f(\varphi_2)$ трансформатора.
 - 9.3. Пример расчета $\Delta U_{\%}=f(\varphi_2)$.
 - 9.4. Изменение коэффициента полезного действия.
10. Выводы.
- Графическая часть курсовой работы:
- эскиз магнитной системы трансформатора с указанием размеров;
 - зависимости $\Delta U=f(\varphi)$, $\Delta U=f(\beta)$;
 - внешняя характеристика $U_2=f(\beta)$;
 - зависимость $\eta=f(\beta)$ при заданном значении $\cos\varphi_2$.

1. ЗАДАНИЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Данные обмера сердечника трансформатора приводятся в [таблице 1.1](#) и берутся из задания на курсовую работу ([см. приложение Д](#)).

Таблица 1.1 – Данные обмера сердечника трансформатора

C	L_c	$C_{ок}$	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	a_1	a_2
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм

a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	B_1	B_2	B_3	b_1	b_2	b_3	$U_{1л}$	Схема и группа соединения
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	кВ	

В [таблице 1.1](#) используются следующие обозначения:

- C- расстояние между осями стержней магнитопровода;
- L_c - высота стержня или высота окна магнитопровода;
- $C_{ок}$ - ширина окна магнитопровода или расстояние между стержнями магнитопровода;
- $A_1 \dots A_7$ - ширина пластин стержня магнитопровода;
- $a_1 \dots a_7$ - толщина пластин стержня магнитопровода;
- $B_1 \dots B_3$ - ширина пластин ярма магнитопровода;
- $b_1 \dots b_3$ - толщина пластин ярма магнитопровода.

Эскизы магнитопровода трансформатора приведены в [приложении А](#).
Группа соединения обмоток (приведена в задании).

Номинальное первичное напряжение U_1 , кВ.

Номинальное напряжение на выходах вторичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода $U_{20}=0,4$ кВ.

В [таблице 1.2](#) приводятся технические данные заказчика. Эта таблица заполняется студентом самостоятельно.

Таблица 1.2 – Технические данные заказчика

Марка электро-технической стали	Толщина листов стали, мм	Вид меж-листовой изоляции	Охлаждение трансформатора	Первичное номинальное напряжение, кВ	Вторичное номинальное напряжение, кВ	Схема и группа соединения

Марки электротехнических сталей, применяемых для изготовления трансформаторов: 1511, 1512, 3411, 3413, 3511, 3513, 3514, 3515.

Первая цифра означает класс стали, по структурному состоянию и виду практики:

- 1 – горячекатаная изотропная;
- 2 – холоднокатаная изотропная;
- 3 – холоднокатаная анизотропная.

При выборе марки стали, предпочтение следует отдавать, холоднокатаной анизотропной стали.

Вторая цифра показывает содержание кремня:

- 1 – нелегированная, содержание кремня 0,4-0,8%;
- 2 – (0,8...1,8)%;
- 3 – (1,8...2,8)%;
- 4 – (2,8...3,8)%;
- 5 – (3,8...4,8)%.

Третья цифра показывает удельные потери:

- 0 – при индукции $B=1,7$ Тл и частоте 50 Гц;
- 1 – при индукции $B=1,5$ Тл и частоте 50 Гц;
- 2 – при индукции $B=1,0$ Тл и частоте 400 Гц.

Четвертая цифра обозначает порядковый номер марки стали.

Толщина листов электротехнической стали трансформаторов принимается равной 0,35 или 0,50 мм. Необходимо учитывать то, что от толщины стали зависят и удельные потери активной и реактивной мощности.

Вид межлистовой изоляции: бумага, лаковое покрытие, жаростойкое покрытие. При выборе вида межлистовой изоляции необходимо обращать внимание на напряжение трансформатора, число ступеней и размеры магнитопровода.

Охлаждение трансформатора: воздушное, масляное, охлаждение негорючим жидким диэлектриком. Воздушное охлаждение применяется в трансформаторах с напряжением $U_{1H}=6$ кВ. ([назад](#))

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ ТРАНСФОРМАТОРА

2.1 Определение сечения и диаметра стержня магнитопровода трансформатора

По данным [таблицы 1.1](#) сечение стержня можно определить при помощи следующего выражения:

$$Q_{ст} = [A_1 a_1 + 2 \cdot (A_2 a_2 + A_3 a_3 + \dots + A_n a_n)] \cdot K_c \cdot 10^{-6}, [м^2];$$

где K_c - коэффициент заполнения стержня железом, зависящий от вида изоляции и толщины листов электротехнической стали. Его значения приведены в [таблице 2.1](#).

Таблица 2.1 – Значения коэффициента заполнения стержня « K_c » железом

Вид изоляции	Толщина листов стали, мм	
	0,35	0,50
Окалина	0,95...0,96	0,97...0,98
Лакировка:		
однократная	0,93...0,94	0,95...0,96
двухкратная	0,91...0,92	0,93...0,94
трехкратная	0,89...0,90	0,91...0,92

Сечение ярма без изоляции определяется из следующего выражения:

$$Q_{я} = [B_1 b_1 + 2 \cdot (B_2 b_2 + \dots + B_n b_n)] \cdot K_c \cdot 10^{-6}, [м^2].$$

Диаметр стержня можно определить из следующего выражения:

$$D_{ст} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{ст}}{K_{\phi} \cdot \pi}}, [м];$$

где K_{ϕ} – коэффициент формы круга, зависящий от числа ступеней стержня.

Значения этого коэффициента приведены в [таблице 2.2](#).

Таблица 2.2 – Значения коэффициента формы круга

Число ступеней	1	2	3	4	5	6 и более
K_{ϕ}	0,587	0,725	0,786	0,817	0,840	0,886

[\(назад\)](#)

2.2 Расчет числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора

Электродвижущая сила обмотки трансформатора определяется из выражения:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot W_{1\phi} \cdot B_{ст} \cdot Q_{ст}, [В] \quad (2.1)$$

где E_1 - электродвижущая сила обмотки трансформатора, В;

f_1 - частота питающего напряжения сети, Гц;

$W_{1\phi}$ – число витков первичной обмотки трансформатора;

$B_{ст}$ – значение индукции в стержне трансформатора (рекомендуемые значения индукции в стержнях силовых трансформаторов приведены в [таблице 2.3](#)), Тл;

$Q_{ст}$ - сечение стержня трансформатора, m^2 .

Таблица 2.3 – Значения индукции в стержнях силовых трансформаторов, Тл

Марка стали	Диаметры стержней, $D_{ст}$, м		
	0,08...0,09	0,09...0,10	0,10...0,14 и выше
1511	0,90...1,20	1,20...1,40	1,40...1,45
3411 и 3412	1,10...1,40	1,40...1,55	1,55...1,60
3413	1,20...1,50	1,50...1,60	1,60...1,65

Примечание: Допустимое значение индукции в стержнях трансформаторов при диаметре стержня более 0,14 м принимается равным 1,7 Тл.

Из выражения [\(2.1\)](#) можно определить число витков первичной обмотки трансформатора, зная остальные величины. Преобразовав выражение [\(2.1\)](#), мы получим:

Определяем число витков первичной обмотки трансформатора.

$$W_{1\phi} = \frac{E_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot B_{cm} \cdot Q_{cm}}$$

Число витков вторичной обмотки аналогичным образом может быть определено из следующего выражения:

$$W_{2\phi} = \frac{E_2}{4,44 \cdot f_1 \cdot B_{cm} \cdot Q_{cm}},$$

где E_2 – электродвижущая сила вторичной обмотки трансформатора.

При соединении вторичной обмотки трансформатора в зигзаг число витков определяется из выражения:

$$W_{2\phi} = \frac{1,15 \cdot E_2}{4,44 \cdot f_1 \cdot B_{cm} \cdot Q_{cm}}.$$

Рассчитанное число витков первичной и вторичной обмоток следует округлить до целого числа. После этого необходимо проверить коэффициенты трансформации:

$$K_{mpU} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} \quad \text{и} \quad K_{mpW} = \frac{W_1}{W_2},$$

где $U_{1л}$ – приведено в задании на курсовой проект;

$$U_{2л} = 380 \text{ В},$$

И если это необходимо, то следует подкорректировать число витков в обмотках. Расхождение между значениями $K_{трU}$ и $K_{трW}$ не должно превышать 1%. ([назад](#))

2.3 Расчёт сечения обмоточного провода для первичной и вторичной обмоток с определением стандартных значений для принятой марки провода

А) Сечение обмоточного провода для первичной обмотки с определением стандартных значений для принятой марки провода.

Для определения размеров обмоточного провода нам необходимо знать сечения окна трансформатора « $Q_{ок} = C_{ок} \times L_c$ » и сечения окна трансформатора приходящееся на одну обмотку « $Q_{об}$ »:

$$Q_{об} = K_3 \frac{Q_{ок}}{N}, [\text{мм}^2],$$

где K_3 - коэффициент заполнения окна трансформатора, зависящий от диаметра стержня, значения коэффициента заполнения окна трансформатора приведены в [таблице 2.4](#);

N - количество обмоток в окне трансформатора (для трехфазного трансформатора $N=4$).

Таблица 2.4 – Значения коэффициента заполнения окна

Диаметр стержня, $D_{ст}$, м	0,095	0,110	0,127	0,155	0,170	0,195	0,220	0,255
K_3	0,34	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,20...0,23

Расчетное сечение проводников обмотки с изоляцией определяется из выражения:

$$q_{1из.р} = \frac{Q_{об}}{W_{1ф}}, [\text{мм}^2].$$

Расчетный диаметр проводника с изоляцией:

$$d_{1из.р} = 1,14 \sqrt{q_{1из.р}}, [\text{мм}].$$

Расчетный диаметр проводника без изоляции:

$$d_{1гол.р} = d_{1из.р} - \delta_{из}, [\text{мм}];$$

где $\delta_{из}$ - двухсторонняя толщина изоляции, зависящая от диаметра провода и его типа (приложение Б).

При изготовлении обмоток трансформатора применяются провода следующих марок: ПБ, АПБ, ПСД, ПСДК. Их характеристики приведены ниже.

ПБ – провод медный с изоляцией из кабельной бумаги. Он выпускается диаметром от 1,32 до 8 мм, а прямоугольный провод этой марки имеет следующие размеры:

- меньший – от 0,80 до 6,00 мм;
- больший – от 2,00 до 20,00 мм.

АПБ – провод алюминиевый изолированный лентами кабельной бумаги, класс нагревостойкости «А». Выпускается тех же размеров, что и провод ПБ.

ПСД – провод медный с изоляцией из бесщелочного стекла, наложенного двумя слоями с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком. Класс нагревостойкости «В».

ПСДК – провод медный с той же изоляцией, но с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком.

Провода ПСД и ПСДК применяются обычно при изготовлении и ремонте сухих трансформаторов.

Стандартное значение диаметра проводника без изоляции можно найти в [приложении В](#). Толщина изоляции для проводов различных марок приведена в [приложении Г](#).

В) сечение обмоточного провода для вторично обмотки с определением стандартных значений для принятой марки провода.

Расчетное сечение проводника с изоляцией для вторичной обмотки определяется из выражения:

$$q_{2из.р} = \frac{Q_{об}}{W_{2\phi}}, [\text{мм}^2].$$

Обычно в силовых трансформаторах для обмоток низкого напряжения используются проводники прямоугольного сечения с размерами « h_2 » и « b_2 » ([рисунок 2.1](#)).

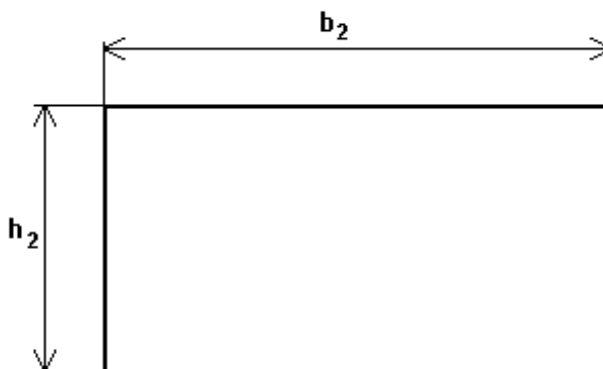


Рисунок 2.1 – Габаритные размеры проводника прямоугольного сечения

Поэтому для обмоток низкого напряжения стандартные значения « h_2 » и « b_2 » выбираются таким образом, чтобы выполнилось следующее условие:

$$(h_2 + \delta_{из}) \cdot (b_2 + \delta_{из}) \cdot n \leq q_{2из},$$

где n – число параллельных проводников.

Если условие не выполняется необходимо взять провод с меньшими размерами и снова проверить выполнение этого условия. Результаты подобной проверки можно свести в [таблицу 2.5](#).

Таблица 2.5 – Результаты выбора размеров прямоугольного провода

h_2	b_2	$\delta_{из}$	n	$q_{2из}$	$q_{2из}$	условие выбора
мм	мм	мм	-	мм ²	мм ²	

Примечание: $(h_2 + \delta_{из}) \cdot (b_2 + \delta_{из}) \cdot n = q'_{2из}$ - выбранное сечение провода. Колонка «условие выбора» заполняется словами «выполняется» или «не выполняется». Если условие выбора выполняется, то тогда принимают эти размеры провода.

[\(назад\)](#)

3. РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЯ НОМИНАЛЬНОГО ФАЗНОГО ТОКА

Расчетное значение номинального фазного тока обмотки низкого напряжения определяется из следующего соотношения:

$$I_{2нф} = j \cdot q_2, [A];$$

где j - значение средней плотности тока, А/мм²

Оно принимается по данным, приведенным в [таблице 3.1](#);

$q_2 = h_2 \cdot b_2 \cdot n$ - сечение голого проводника без изоляции.

Таблица 3.1 – Значение средней плотности тока в обмотках высокого и низкого напряжения масляных трансформаторов

Диаметр стержня, м	до 0,16	>0,16
Многослойные обмотки высокого напряжения, А/мм ²	1,7...4,0	1,5...3,0
Однослойный обмотки низкого напряжения, А/мм ²	3,0...4,5	1,8...3,5

Значение тока $I_{2нф}$ необходимо определить для разных допустимых значений плотности тока j_{2min} и j_{2max} . Полученные результаты необходимо свести в [таблицу 3.2](#).

Таблица 3.2 – Результаты расчета тока вторичной обмотки

Показатели	j_{2min}	j_{2max}
$I_{2нф}, A$	$I_{2нфmin}$	$I_{2нфmax}$

[\(назад\)](#)

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТИРОВОЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПОЛНОЙ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Ориентировочное значение полной номинальной мощности трансформатора можно определить из выражение:

$$S = 3 \times U_{2ф} I_{2ф} \cdot 10^{-3} = \sqrt{3} U_{2л} I_{2л} \cdot 10^{-3}, \text{ кВА};$$

где $U_{2ф}$ и $U_{2л}$ - фазное и линейное значение напряжений вторичной обмотки, В;
 $I_{2ф}$ и $I_{2л}$ - фазное и линейное значение тока вторичной обмотки, А.

Мощность трансформатора рассчитывают для значения тока, приведенных в таблице 3.2. Из полученного диапазона мощностей выбирается стандартные значения мощности трансформатора (25, 40, 60, 100, 160, 320, 400, 630, 800, 1000, 1600 или 2500 кВА, силовые трансформаторы мощностью 320 или 800 кВА, в настоящее время изготавливаются только по заказу предприятия). Для данных стандартных значений мощностей определяем значения фазного тока в первичной $I_{1\phi} = \frac{S_n}{3 \cdot U_{1\phi}}$ и во вторичной $I_{2\phi} = \frac{S_n}{3 \cdot U_{2\phi}}$ обмотках и проверяем значение плотности тока в этих обмотках:

$$j_1 = \frac{I_{1\phi}}{q_1}, [\text{А/мм}^2]; j_2 = \frac{I_{2\phi}}{q_2}, [\text{А/мм}^2].$$

Полученные значения плотности тока сравниваем с допустимыми значениями плотности тока в обмотках. По результатам сравнения выбираем ту стандартную мощность трансформатора, при которой полученные значения плотностей токов в обмотках находятся в допустимых пределах.

Если плотность тока находится в допустимых пределах, то можно продолжить дальнейшие расчеты параметров трансформатора. Если плотность тока больше допустимого значения, то необходимо уменьшить выбранную мощность трансформатора и провести расчет плотности тока при новом значении мощности трансформатора.

[\(назад\)](#)

5. РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ ОБМОТОК ВЫСОКОГО И НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЙ

Определим число витков в одном слое для обмотки высокого и низкого напряжений.

$$W_{сл1} = \frac{L_c - 2a_{01}}{d_{1уз}}; W_{сл2} = \frac{L_c - 2a_{02}}{n \cdot h_{2уз}}, [\text{ВИТКОВ}]$$

где a_{01} и a_{02} – изоляционные расстояния между ярмом и обмотками высокого и низкого напряжений, соответственно ([рисунк 5.1](#)). Значения этих величин принимают по [таблице 5.1](#);

n – число параллельных проводников.

Таблица 5.1 – Минимальные размеры изоляционных промежутков при масляном охлаждении трансформатора, мм

Напряжение, кВ		Обмотка низкого напряжения		Обмотка высокого напряжения	
--	δ_{02}	a_{02}	δ_{12}	a_{01}	δ_{11}
До 1	5	-	-	-	-
от 3 до 6	12	20	8,5	20	10
10	18	30	12,0	30	14
35	30	60	27,0	60	30

где $a_{01} = a_{02}$ – расстояние от обмоток НН и ВН до ярма;

δ_{02} – расстояние от обмотки НН до стержня;

δ_{12} – расстояние между обмотками ВН и НН одной фазы;

δ_{11} – расстояние между обмотками ВН.

Число слоев обмотки высокого и низкого напряжения определяется из следующих выражений:

$$n_{cl1} = \frac{W_{1\phi}}{K \cdot W_{cl1}} \text{ и } n_{cl2} = \frac{W_{2\phi}}{K \cdot W_{cl2}}, \text{ [слоёв]},$$

где $K=1$ – для трехфазных трансформаторов;

$K=2$ – для однофазных трансформаторов.

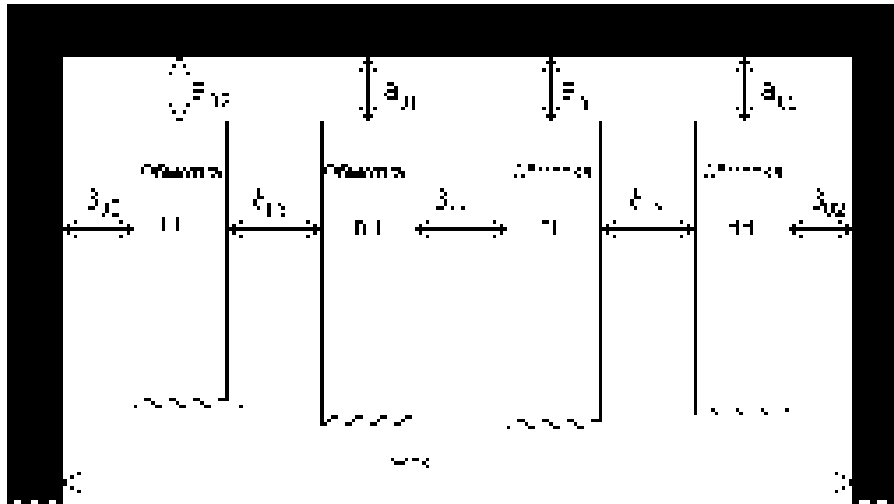


Рисунок 5.1 – Изоляционные расстояния в трехфазной двухобмоточном трансформаторе

Радиальные размеры обмоток ВН и НН определяются следующим образом.

Обмотка высокого напряжения - $B_1 = n_{cl1} \cdot (d_{1из} + \delta_{1из})$, [мм].

Обмотка низкого напряжения - $B_2 = n_{cl2} \cdot (d_{2из} + \delta_{2из})$, [мм].

где $d_{1из}$ - стандартное значение диаметра проводников обмотки ВН с изоляцией;

$d_{2из}$ - стандартное значение ширины проводников обмотки НН с изоляцией;

$\delta_{1из}$ и $\delta_{2из}$ - толщина межслоевой изоляции обмоток ВН НН, зависит от величины межслоевого напряжения, (см. в таблице 5.2), материалом изоляции является кабельная бумага марки К-120.

Таблица 5.2 – Номинальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках из круглого и прямоугольного провода

Суммарное рабочее напряжение двух слоев обмотки, В	Число слоев кабельной бумаги на толщину листов, мм	Выступ междуслойной изоляции на торцах обмотки (на одну сторону), см
до 1000	2×0,12	1,0
от 1000 до 2000	3×0,12	1,6
от 2001 до 3000	4×0,12	1,6
от 3001 до 3500	5×0,12	1,6
от 3501 до 4000	6×0,12	2,2
от 4001 до 4500	7×0,12	2,2

от 4501 до 5000	8×0,12	2,2
от 5001 до 5500	9×0,12	2,2

Таблица 5.3 – Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических катушечных обмотках из круглого провода

Рабочее напряжение двух слоев обмотки, В	Толщина изоляции, мм	Материал изоляции
до 150	2×0,05	Телефонная бумага
от 151 до 200	1×0,2	Кабельная бумага или электроизоляционный картон
от 201 до 300	2×0,12 или 1×0,5	

Примечание. Данные таблиц 5.2 и 5.3 приведены для трансформаторов мощностью до 630 кВА включительно. При мощности от 1000 кВА и выше междуслойную изоляцию следует принимать по таблицам, но не менее 6×0,12 мм; выступ изоляции не менее 2 см.

При этом межслойное напряжение определяется следующим образом:

$$\Delta U_{ст1} = \frac{U_1}{n_{ст1}}; \Delta U_{ст2} = \frac{U_2}{n_{ст2}}, [В],$$

[\(назад\)](#)

6. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБМОТОК В ОКНЕ СЕРДЕЧНИКА ТРАНСФОРМАТОРА

При этом должно выполняться следующее условие:

$$C_{ок} \geq 2 \cdot (B_1 + B_2 + \delta_{02} + \delta_{12}) + \delta_{11}$$

Если условие не выполняется необходимо проверить правильность выбора размеров провода первичной и вторичной обмоток. Если это необходимо, то следует уменьшить размеры сечения провода и провести снова расчета до пункта 6, включительно.

[\(назад\)](#)

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Для этого необходимо выполнить следующее.

7.1 Расчет массы обмоток высокого и низкого напряжений

Ее можно определить, зная внутренний и наружный диаметр обмоток. Эти величины определяются из следующих выражений:

$$D_{вн.2} = D_{ст} + 2\delta_{02}, [мм], \quad (7.1)$$

$$D_{н.2} = D_{вн.2} + 2\delta_2, [мм], \quad (7.2)$$

$$D_{вн.1} = D_{н.2} + 2\delta_{12}, [мм], \quad (7.3)$$

$$D_{н.1} = D_{вн.1} + 2\delta_1, [мм], \quad (7.4)$$

где $D_{вн1}$, $D_{вн2}$ - внутренние диаметры обмоток высокого и низкого напряжений;

$D_{н1}, D_{н2}$ - наружные диаметры обмоток высокого и низкого напряжений.

Тогда средняя величина диаметров обмоток определяется из следующих выражений:

$$D_{cp1} = \frac{D_{н.1} + D_{вн.1}}{2}; [\text{мм}], \quad (7.5)$$

$$D_{cp2} = \frac{D_{н.2} + D_{вн.2}}{2}, [\text{мм}]. \quad (7.6)$$

Зная эти размеры, можно определить массу обмоток выполненных из медных или алюминиевых проводов..

- масса обмоток высокого напряжения выполненных из медных проводов (кг);

$$G_{m1} = 28 \cdot m \cdot D_{cp1} \cdot W_{1\phi} \cdot q_1 \cdot 10^{-3}, [\text{кг}],$$

где D_{cp1} – значение среднего диаметра, в формулу подставляется в метрах;

q_1 – значение сечения проводника без изоляции по ГОСТ, в формулу подставляется в мм^2 .

- масса обмоток высокого напряжения, выполненных из алюминиевых проводов (кг);

$$G_{a1} = 8,47 \cdot m \cdot D_{cp1} \cdot W_{1\phi} \cdot q_1 \cdot 10^{-3}, [\text{кг}].$$

Масса обмоток низшего напряжения определяется из следующих выражений (кг):

$$G_{m2} = 28 \cdot m \cdot D_{cp2} \cdot W_{2\phi} \cdot q_2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{кг}];$$

$$G_{a2} = 8,47 \cdot m \cdot D_{cp2} \cdot W_{2\phi} \cdot q_2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{кг}].$$

[\(назад\)](#)

7.2 Определение потерь короткого замыкания в трансформаторе

Для медных проводов потери мощности могут быть определены из следующих выражений:

$$\Delta P_{об1} = 2,4 \cdot j_1^2 \cdot G_{m1}, [\text{Вт}];$$

$$\Delta P_{об2} = 2,4 \cdot j_2^2 \cdot G_{m2}, [\text{Вт}].$$

Для алюминиевых проводов потери мощности могут быть определены из следующих выражений:

$$\Delta P_{об1} = 12,75 \cdot j_1^2 \cdot G_{a1}, [\text{Вт}];$$

$$\Delta P_{об2} = 12,75 \cdot j_2^2 \cdot G_{a2}, [\text{Вт}].$$

Это объясняется тем, что удельное сопротивление меди при температуре 75°C составляет $0,02135$ (Ом·мм)/м, а удельное сопротивление алюминия составляет $0,0344$ (Ом·мм)/м.

Значение плотности тока в формулы подставляют из пункта 4, для выбранного стандартного значения мощности трансформатора.

Тогда потери мощности короткого замыкания равны:

$$\Delta P_{\kappa} = \Delta P_{об1} + \Delta P_{об2} \text{ [Вт]}.$$

Зная потери короткого замыкания, можно определить значение активного сопротивления короткого замыкания трансформатора:

$$R_{\kappa} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{3 \cdot I_{1\phi}^2}, \text{ [Ом]}.$$

[\(назад\)](#)

7.3 Определение потерь мощности холостого хода в трансформаторе

Для этого необходимо определить потери в стали

$$P_c = (m_{ст} \cdot \Delta P_{ст} \cdot G_{ст} + 2\Delta P_{я} \cdot G_{я}) \cdot K_d, \text{ [Вт]};$$

где $m_{ст}$ – количество стержней магнитопровода.

K_d – коэффициент добавочных потерь ([таблица 7.1](#)).

Таблица 7.1 – Коэффициент добавочных потерь для прямоугольного сечения ярма, K_d

Диаметр стержня, м	0,20	0,21...0,30	0,31...0,50	более 0,50
K_d	1,00...1,01	1,020...1,050	1,051...1,100	1,101...1,15

$\Delta P_{ст}$, $\Delta P_{я}$ – удельные потери в ярме и в стержне, Вт; они зависят от марки стали, индукции и толщины листов стали; их значения приведены в [таблице 7.2](#);

Таблица 7.2 – Удельные потери в ярме и стали, $\Delta P_{ст}$, $\Delta P_{я}$

Марка стали	Толщина листов, мм	$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	$P_{1,8/50}$
3411	0,50	1,25	2,80	3,80	3,84
3412	0,50	1,15	2,50	3,50	3,49
3413	0,50	1,05	2,30	3,20	3,18
3411	0,35	1,00	2,20	3,20	3,00
3412	0,35	0,90	1,90	2,90	2,72
3413	0,35	0,80	1,70	2,60	2,38

Примечание. $P_{1,0/50}$ - в числителе удельных потерь указывается значение индукции в [Тл], а в знаменателе – частота [Гц].

$G_{ст}$ – масса одного стержня;

$$G_{ст} = Q_{ст} \cdot L_c \cdot \gamma_c, \text{ [кг]};$$

где γ_c – удельный вес стали: для холоднокатанной стали $\gamma_c = 7650 \text{ кг/м}^3$;
для горячекатанной стали $\gamma_c = 7550 \text{ кг/м}^3$

$G_{я}$ – масса одного ярма.

$$G_{я} = Q_{я} \cdot L_{я} \cdot \gamma_c, [\text{кг}].$$

Длина ярма:

$$L_{я} = 2 \cdot C_{ок} + D_c, [\text{м}].$$

Значение индукции в ярме определяется из следующего выражения:

$$B_{я} = B_c \frac{Q_{ст}}{Q_{я}}, [\text{Тл}]$$

По значению индукции в ярме из [таблицы 7.2](#) определяют значение удельных потерь в ярме. Так как $B_{я}$ очень часто не совпадает со значениями, приведенными в таблице, то данные приведенные в таблице необходимо интерполировать.

[\(назад\)](#)

7.4 Определение коэффициента полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия определяется из выражения:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{к} + P_c}{S_n \cdot \cos \varphi_{нагр} + P_{к} + P_c}, [\%]$$

где S_n – номинальная мощность в ВА;

$\cos \varphi_{нагр} = 0,80$ - коэффициент мощности нагрузки.

[\(назад\)](#)

7.5 Определение величины тока холостого хода и его активной и реактивной составляющих

Для определения величины тока холостого хода необходимо в первую очередь определить намагничивающую мощность трансформатора в режиме холостого хода. Эту величину можно определить из выражения:

$$Q_{0p} = (q_{ст} \cdot G_{ст} + q_{я} \cdot G_{я} + 6 \cdot q_z \cdot Q_{ст}) K_D, [\text{ВАр}],$$

где $q_{ст}$ и $q_{я}$ – удельные намагничивающие мощности для стали стержня и ярма, ВА/кг.

q_z – удельная намагничивающая мощность воздушного зазора, для индукции B_c , ВА/м² ([см. таблицу 7.3](#));

K_D – коэффициент добавочных потерь ([таблица 7.1](#)).

Значения $q_{я}$, $q_{ст}$ и q_z принимается по данным [таблице 7.3](#).

Реактивная составляющая тока холостого хода определяется из выражения:

$$I_{0p} = \frac{Q_{0p} \cdot 100}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi}}, [\%],$$

где Q_{0p} – намагничивающая мощность трансформатора в режиме холостого хода, ВАр.

Активная составляющая тока холостого хода определяется из выражения:

$$I_{0a} = \frac{P_{cm}}{10 \cdot S}, [\%].$$

Тогда полное значение тока холостого хода можно определить из выражения:

$$I_{xx} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}, [\%].$$

Ток холостого хода не должен превышать 3%. Если этого не происходит, то необходимо проанализировать проведенные расчеты. На основании анализа внести коррективы в выбор марки стали, индукции, толщины листов стали и т.д. и повторить расчеты.

Таблица 7.3 – Удельная намагничивающая мощность для холоднокатанной стали и зазоров при различных значениях индукции и частоте 50 Гц

В	Марка стали			q_z	В	Марка стали			q_z
Тл	3412	3413	3414	ВАр/м ²	Тл	3412	3413	3414	ВАр/м ²
1,20	2,02	1,57	1,10	2770	1,50	5,30	3,85	1,97	16700
1,30	2,51	2,00	1,13	5500	1,52	5,98	4,23	2,10	18700
1,32	2,72	2,13	1,37	6650	1,54	6,66	4,61	2,93	20600
1,34	2,90	2,27	1,44	7750	1,56	7,60	5,08	2,40	22700
1,36	3,07	2,38	1,51	8900	1,58	8,60	5,64	2,60	24600
1,38	3,25	2,50	1,58	10000	1,60	10,00	6,20	2,80	26600
1,40	3,55	2,70	1,65	11100	1,62	12,00	7,20	3,10	29700
1,42	3,83	2,90	1,70	12200	1,64	14,00	8,20	3,44	32800
1,44	4,11	3,10	1,75	13300	1,66	17,40	9,76	4,00	36400
1,46	4,46	3,33	1,80	14400	1,68	22,40	11,88	4,80	40400
1,48	4,88	3,59	1,87	15500	1,70	27,00	14,00	5,60	44400

[\(назад\)](#)

8. ПРОВЕРКА УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Нам необходимо рассчитать удельную тепловую нагрузку трансформатора и сравнить её с допустимой величиной. Если полученное значение меньше или равно допустимому значению, то расчёт выполнен правильно.

Удельная тепловая нагрузка первичной обмотки определяется из выражения:

$$\Delta P'_{об1} = \frac{\Delta P_{об1}}{m \cdot F_{ох11}}, [\text{Вт/м}^2];$$

где m – число фаз обмотки;

$F_{\text{охл.1}}$ – площадь охлаждения обмотки высокого напряжения, м^2 .

$$F_{\text{охл1}} = 2 \cdot \pi \cdot K_{\text{зак}} \cdot D_{\text{ср1}} \cdot h_{\text{об}}, [\text{м}^2]$$

где $K_{\text{зак}}$ – коэффициент закрытия, учитывающий уменьшение нагрузки охлаждающей поверхности за счёт различных прокладок, принимается равным 0,8;

$h_{\text{об}} = L_c - 2 \cdot a_{01}$ – высота обмотки, м;

Удельная тепловая нагрузка вторичной обмотки определяется из выражения

$$\Delta P'_{\text{об2}} = \frac{\Delta P_{\text{об2}}}{m \cdot F_{\text{охл2}}}, [\text{Вт}/\text{м}^2];$$

где m – число фаз обмотки;

$F_{\text{охл.2}}$ – площадь охлаждения обмотки низкого напряжения, м^2 .

$$F_{\text{охл2}} = 2 \cdot \pi \cdot K_{\text{зак}} \cdot D_{\text{ср2}} \cdot h_{\text{об}} [\text{м}^2]$$

Удельная тепловая нагрузка на магнитопровод трансформатора определяется из выражения:

$$\Delta P'_{\text{ст}} = \frac{P_c}{F_{\text{охл.с}}}, [\text{Вт}/\text{м}^2];$$

где $F_{\text{охл.с}}$ – площадь охлаждения магнитопровода трансформатора, м^2 .

$$F_{\text{охл.ст}} = m \cdot \pi \cdot K_{\text{зак}} \cdot D_{\text{ср}} \cdot L_c + 2 \cdot \pi \cdot K_{\text{зак}} \cdot D_{\text{я}} \cdot L_{\text{я}}, [\text{м}^2],$$

где $D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{ср1}} + D_{\text{ср2}}}{2}$ – средний диаметр, м.

$D_{\text{я}}$ – диаметр ярма магнитопровода трансформатора.

$$D_{\text{я}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{я}}}{K_{\phi} \cdot \pi}}, [\text{м}]$$

Полученные значения $\Delta P'_{\text{об1}}$, $\Delta P'_{\text{об2}}$ и $\Delta P'_{\text{ст}}$ необходимо сравнить с данными, приведенными в [таблице 8.1](#).

Таблица 8.1 – Допустимые удельные тепловые нагрузки силовых трансформаторов с естественным масляным охлаждением

Части трансформатора	Допустимые удельные тепловые нагрузки, ΔP , $\text{Вт}/\text{м}^2$
Катушки:	
многослойные (ВН)	1000...1200
однослойные (НН)	1400...1600
Сердечник (магнитопровода)	3000

В этом случае, если удельные тепловые нагрузки силовых трансформаторов превышают значения, приведенные в таблице 8.1, то

необходимо провести анализ выполненных расчетов, в процессе которого необходимо выявить из-за чего это происходит. После анализа следует изменить необходимые параметры и повторить расчет.

[\(назад\)](#)

9. РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА

Основными эксплуатационными показателями трансформаторов является:

- изменение вторичного напряжения на выводах обмотки, $\Delta U\%$;
- коэффициент полезного действия.

9.1 Изменение вторичного напряжения на зажимах трансформатора

Изменение вторичного напряжения может быть определено как расчётным, так и графическим способом. В курсовой работе необходимо использовать оба способа и полученные результаты сравнить.

В курсовой работе необходимо построить зависимость $\Delta U\% = f(\varphi_2)$ при изменении φ_2 от $+90^\circ$ до -90° с интервалом $\cos\varphi_2 = 0,1$ при изменении от 1 до 0 и зависимость $\Delta U\% = f(\beta)$ при $\cos\varphi_2 = const$ и изменении β в интервале 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25.

Построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2=f(\beta)$ и $U_2=f(\varphi_2)$.

[\(назад\)](#)

9.1.1 Расчётный метод определения изменения вторичного напряжения

Полная величина напряжения короткого замыкания связана с его составляющими выражением:

$$U_{K\%} = \sqrt{U_{ка\%}^2 + U_{кр\%}^2} \cdot [\%]$$

Активная и реактивная составляющие напряжения к.з. рассчитываются по формулам:

$$U_{ка} = \frac{\Delta P_k}{10 \cdot S_n}, [\%],$$

где ΔP_k - потери короткого замыкания, Вт;

S_n - номинальная мощность, кВА.

$$U_{кр} = \frac{7,9 \cdot I_{1\phi} \cdot W_{1\phi} \cdot f_1 \cdot \pi \cdot D_{cp} \cdot \delta \cdot K_p \cdot 10^{-4}}{e_w \cdot h_{об}}; [\%],$$

где δ - ширина приведённого канала рассеяния.

$$\delta = \delta_{12} + \frac{e_1 + e_2}{3}, [M],$$

Где e_1 и e_2 - ширина катушек обмотки высокого и низкого напряжений;

K_p - коэффициент Роговского, учитывающий отклонение реального потока рассеивания от идеального параллельного потока.

$$K_p = 1 - \frac{\delta_{12} + \epsilon_1 + \epsilon_2}{\pi \cdot h_{об}}$$

$h_{об} = L_c - 2 \cdot a_{01}$ - высота обмотки, [м];

$D_{cp} = \frac{D_{cp1} + D_{cp2}}{2}$ - средний диаметр, [м].

e_w - э.д.с. приходящаяся на 1 виток, [В].,

$$e_w = \frac{U_{1\phi}}{n_{cl1} \cdot W_{cl1}} = \frac{U_{1\phi}}{W_{1\phi}}, \text{ [В]}$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотки определяется из выражения:

$$U_{2\phi} = U_{2\phi 0} - \Delta U_2, \text{ [В]},$$

где $U_{2\phi 0}$ - фазное напряжение на зажимах трансформатора в режиме холостого хода, если мы находим линейное напряжение $U_{2\phi}=400$ В;

ΔU_2 - изменение вторичного напряжения в именованных единицах:

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2\phi} \Delta U_{\%}}{100}, \text{ [В]}.$$

Изменение вторичного напряжения зависит от степени загрузки трансформатора следующим образом:

$$\Delta U_{\%} = \beta \cdot (U_{ка\%} \cdot \cos \varphi_2 + U_{кр\%} \cdot \sin \varphi_2), \text{ [\%]}.$$

Изменение вторичного напряжения в именованных единицах:

По полученным значениям $\Delta U_{2\%}$ необходимо построить внешние характеристики трансформатора $U_2 = f(\beta)$ и $U_2 = f(\varphi_2)$.

[\(назад\)](#)

9.1.2 Пример расчета $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$

Для трехфазного силового трансформатора ТМ-6300/35 мощностью $S_H=6300$ кВА; $U_{1H}=35$ кВ; $U_{20}=10$ кВ; $I_{1H}=1040$ А; $I_{2H}=367,7$ А; $P_0=18,5$ кВт; $U_K=7,5\%$; $P_K=64,13$ кВт.

Построить зависимость $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$. При активно-емкостной нагрузке

$$\Delta U_{\%} = (U_{ка\%} \cdot \cos \varphi_2 + U_{кр\%} \cdot \sin \varphi_2).$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_{ка\%} = \frac{\Delta P_K}{10 \cdot S_H},$$

$$U_{ка\%} = \frac{64130}{10 \cdot 6300} = 1,018\%.$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_{кр\%} = \sqrt{U_{к\%}^2 - U_{ка\%}^2} = \sqrt{7,5^2 - 1,018^2} = 7,43\% .$$

Расчет $\Delta U_{\%}$ сведен в [таблицу 9.1](#). По этим данным строим зависимость $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$ ([см. рисунок 9.1](#)).

Таблица 9.1 – Изменение вторичного напряжения от характера нагрузки

cos φ	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
sin φ	0	0,44	0,6	0,71	0,8	0,87	0,92	0,95	0,98	0,99	1
φ ₂	0	25,9	36,9	45,6	53,2	60	66,5	72,6	78,5	84,3	90
ΔU _% при +φ ₂	1,018	4,16	5,27	6,017	6,55	6,943	7,12	7,394	7,48	7,49	7,43
ΔU _% при -φ ₂	0	-2,32	-3,64	-4,6	-5,93	-6,43	-6,783	-6,43	-7,08	-7,29	-7,43

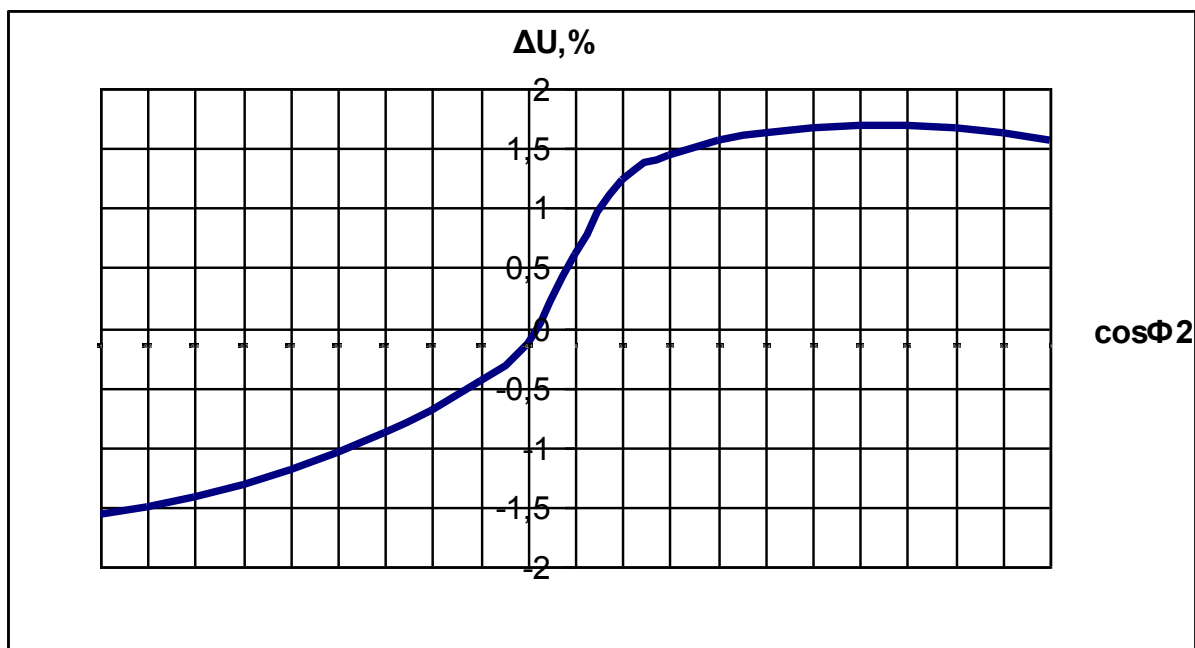


Рисунок 9.1 – Зависимость $\Delta U_{\%} = f(\cos \varphi_2)$
([назад](#))

9.1.3. Построение упрощенной векторной диаграммы для определения изменения вторичного напряжения

Изменение вторичного напряжения графическим способом определяется с использованием упрощенной векторной диаграммы трансформатора. Упрощенная векторная диаграмма строится в соответствии с уровнем напряжений:

$$\underline{U}_{1н} = -\underline{U}'_2 + I_{1н} \cdot R_k + jI_{1н} \cdot x_k, \quad (9.1)$$

Где $\underline{U}_{1н}$ - вектор первичного напряжения;

\underline{U}'_2 - вектор приведенного вторичного напряжения;

$I_{1н}$ - вектор тока первичной обмотки;

R_k - активная составляющая сопротивления короткого замыкания, [см. раздел 7.2](#), Ом;

x_k - реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания, Ом.

$$x_k = \frac{U_{k\%} \cdot U_\phi}{I_\phi \cdot 100}, [\text{Ом}]$$

Построение векторной диаграммы выполняется следующим образом:

- выбираются масштабы тока и напряжения;
- из точки 0, в принятом масштабе напряжений, проводим вертикально вектор напряжения $-U'_2$ ([рисунок 9.2](#));
- под углом φ_2 , соответствующим активно-индуктивному характеру нагрузки, к вектору напряжения $-U'_2$ проводим вектор тока $-I'_2$;
- к вектору напряжения $-U'_2$, согласно [уравнению 9.1](#) прибавляются векторы падения напряжения $I_{1н}R_k$ и $jI_{1н}x_k$;
- соединив конец вектора $jI_{1н}x_k$ с началом вектора $-U'_2$ (точка 0), получаем вектор $U_{1н}$;
- из точки 0, как центра, описывается дуга окружности радиусом $AO = U_{1н}$, по которой перемещается конец вектора $U_{1н}$;
- треугольник ABC переносим параллельно так, чтобы его вершина A совпала с точкой 0. Получается треугольник $OB'C'$;
- из точки C' , как из центра, описываем дугу окружности радиусом CC' , по которой при изменении нагрузки перемещается конец вектора $-U'_2$.

На [рисунке 9.2](#) изображена упрощенная векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке. В виду малой величины угла θ можно записать $U_1 \approx OE$.

Тогда, для приведенного трансформатора изменение вторичного напряжения на зажимах обмотки трансформатора рассчитывается по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100, \%$$

Величины $U_{1н}$ и $-U'_2$ определяются из [рисунка 9.2](#) при разных значениях угла нагрузки (коэффициента мощности).

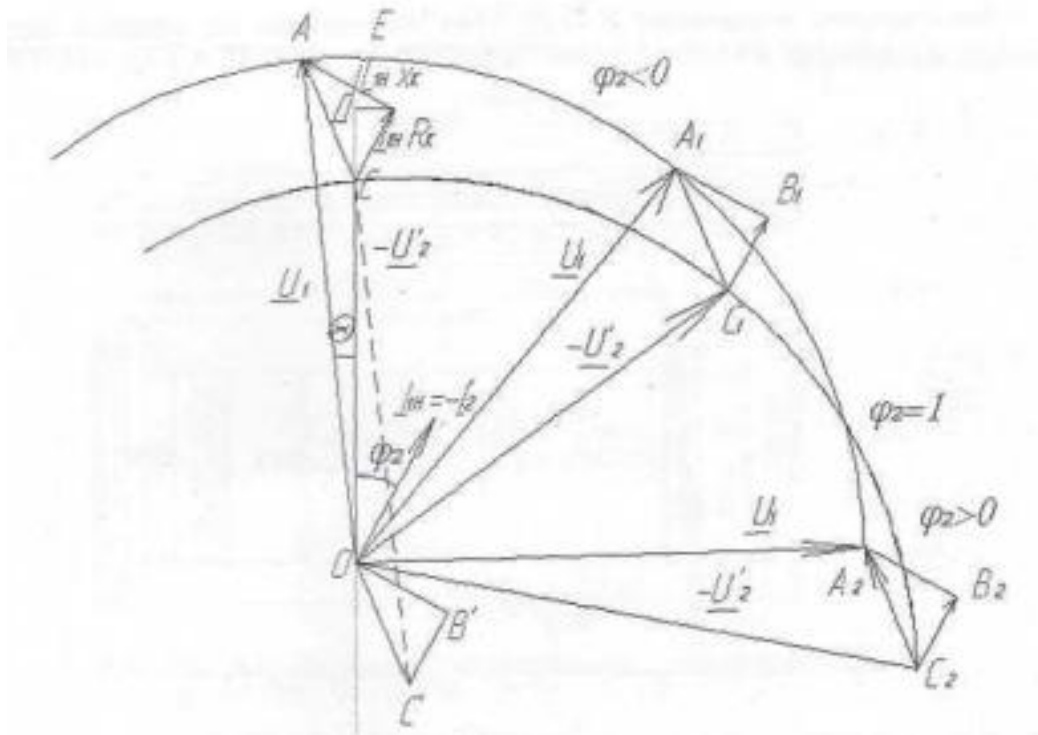


Рисунок 9.2 – Упрощенная векторная диаграмма
([назад](#))

9.2 Изменение коэффициента полезного действия

У современных трансформаторов коэффициент полезного действия (к.п.д.) составляет 0,96 при мощности 5 кВА и 0,995 при мощности несколько десятков тысяч кВА.

Коэффициент полезного действия может быть определён косвенными методами. Наибольшее распространение получило метод, основанный на использовании данных опытов холостого хода и короткого замыкания. На основании этого метода К.П.Д. определяется по формуле:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_k},$$

где β - коэффициент загрузки;

S_n - номинальная мощность трансформатора, ВА;

$P_0 = P_c$ - потери мощности холостого хода, равные потерям в стали, Вт;

P_k - потери мощности короткого замыкания, Вт.

Максимальное значение К.П.Д. достигается при оптимальной степени загрузки, она может быть определена из выражения:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{P_c}{P_k}},$$

Расчёт η целесообразно свести в [таблицу 9.2](#).

Таблица 9.2 – Изменение КПД от коэффициента загрузки при различных значениях $\cos\varphi_2$

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
η при $\cos\varphi=0.8$	-	0,954	0,975	0,981	0,983	0,984	0,985	0,985	0,984	0,984	0,983
η при $\cos\varphi=1$	-	0,963	0,980	0,985	0,987	0,988	0,988	0,988	0,987	0,987	0,986

Зависимость К.П.Д. трансформатора от степени загрузки приведена на [рисунке 9.3](#).

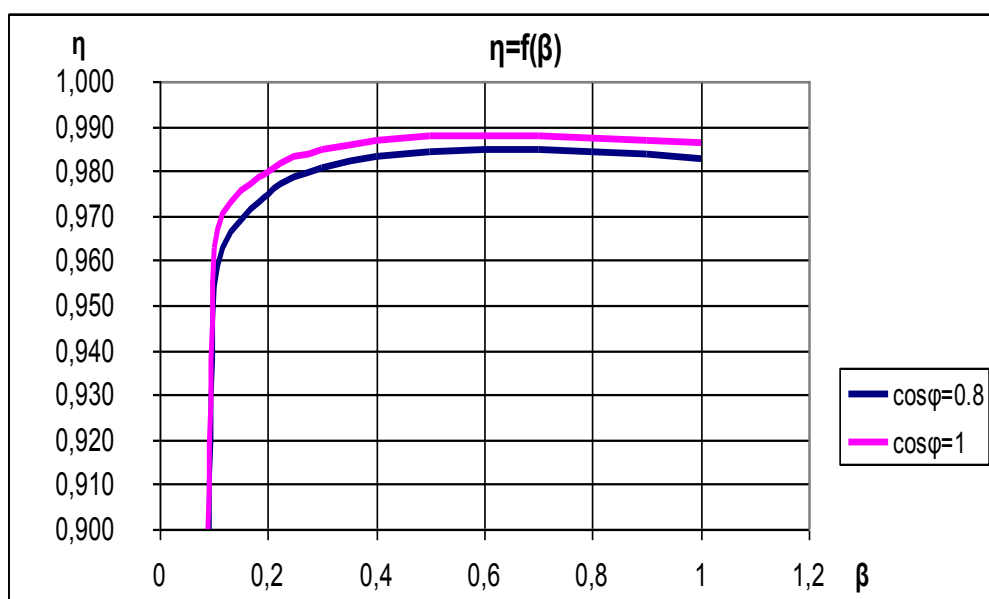


Рисунок 9.3 - Зависимость изменения К.П.Д. трансформатора от степени загрузки

[\(назад\)](#)

10. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ ЗАДАНИЙ ПО ДИАГНОСТИКЕ И ИСПЫТАНИЯМ ТРАНСФОРМАТОРОВ

10.1 Профилактические испытания

10.1.1 Профилактические испытания - термины и определения

Профилактические электрические измерения проводятся для выявления неисправного или не соответствующего сегодняшним нормам и правилам устройства электроустановок (ПУЭ, ПТЭЭП) электрооборудования. Это необходимо для предотвращения несчастных случаев, связанных с неисправной электропроводкой, а также – предотвращения возгораний электроустановок.

Испытания – это разновидность контроля. В систему испытаний входят следующие основные элементы:

а) **объект испытаний** – изделие, подвергаемое испытаниям. Главным признаком объекта испытаний является то, что по результатам испытаний принимается решение именно по этому объекту: о его годности или браковке, о возможности предъявления на последующие испытания, о возможности серийного выпуска и т.п. Характеристики свойств объекта при испытаниях можно определить путем измерений, анализов или диагностирования;

б) **условия испытаний** – это совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. Условия испытаний могут быть реальными или моделируемыми, предусматривать определение характеристик объекта при его функционировании и отсутствии функционирования, при наличии воздействий или после их приложения;

в) **средства испытаний** – это технические устройства, необходимые для проведения испытаний. Сюда входят средства измерений, испытательное оборудование и вспомогательные технические устройства;

г) **исполнители испытаний** – это персонал, участвующий в процессе испытаний. К нему предъявляются требования по квалификации, образованию, опыту работы и другим критериям;

д) **нормативно-техническая документация (НТД)** на испытания, которую составляют комплекс стандартов, регламентирующих организационно-методические и нормативно-технические основы испытаний; комплекс стандартов системы разработки и постановки продукции на производство; нормативно-технические и технические документы, регламентирующие требования к продукции и методам испытаний; Нормативно-технические документы, регламентирующие требования к средствам испытаний и порядок их использования.

Испытания как основная форма контроля электрооборудования представляют собой экспериментальное определение количественных и качественных показателей свойств изделия как результата воздействия на него при его функционировании, а также при моделировании объекта.

Цели испытаний различны на различных этапах проектирования и изготовления электрооборудования. К основным целям испытаний можно отнести:

а) выбор оптимальных конструктивно-технологических решений при создании новых изделий;

б) доводку изделий до необходимого уровня качества;

в) объективную оценку качества изделий при их постановке на производство и в процессе производства;

г) гарантирование качества изделий при международном товарообмене.

Испытания служат эффективным средством повышения качества, так как **позволяют выявить:**

а) недостатки конструкции и технологии изготовления электрооборудования, приводящие к срыву выполнения заданных функций в условиях эксплуатации;

б) отклонения от выбранной конструкции или принятой технологии;

в) скрытые дефекты материалов или элементов конструкции, неподдающиеся обнаружению существующими методами технического контроля;

г) резервы повышения качества и надежности разрабатываемого конструктивно-технологического варианта изделия.

По результатам испытаний изделий в производстве разработчик устанавливает причины снижения качества.

В данной работе мы рассматриваем основные понятия, общие методические указания по испытаниям электрооборудования, подробно останавливаемся на испытаниях электродвигателей переменного тока.

[\(назад\)](#)

10.1.2 Профилактические испытания трансформаторов

Профилактические испытания выполняют между капитальными ремонтами в сроки, установленные местными инструкциями.

Во время испытаний измеряют сопротивление изоляции обмоток, тангенс угла диэлектрических потерь и определяют коэффициент абсорбции. Если результаты испытаний указывают на увлажнение изоляции, трансформатор сушат. Изоляцию доступных стяжных болтов и ярмовых балок испытывают переменным напряжением 1 кВ в течение 1 мин. Нарушение изоляции этих элементов может вызвать тяжелые последствия в эксплуатации, так как ведет к образованию короткозамкнутого контура в магнитопроводе и «пожару» стали.

Измеряя сопротивление обмоток трансформатора при всех положениях переключателя ответвлений, можно обнаружить плохие контакты и обрывы в обмотке, а также проверить правильность подключения выводов обмоток к переключателю. Эту же цель преследуют, измеряя коэффициент трансформации трансформатора на всех ответвлениях. При переходе от ответвления к ответвлению сопротивление обмотки и коэффициент трансформации должны изменяться каждый раз на одинаковую величину.

Измерение тока холостого хода трансформатора позволяет обнаружить витковые замыкания в обмотках и повреждение магнитопровода. Ток холостого хода в этом случае возрастает.

При новом включении необходимо также проверить группу соединений трансформатора и произвести его фазировку. Обязательным является испытание масла из трансформатора и его маслонаполненных вводов. Состояние вводов оценивают, измеряя тангенс угла диэлектрических потерь.

При текущих ремонтах трансформатор испытывают в объемах, установленных местными инструкциями.

Испытания трансформаторного масла. Масло испытывают на электрическую прочность – пробой, содержание влаги и диэлектрические потери. Испытание трансформаторного масла на пробой проводят в маслопробойном аппарате. В чистую сухую стеклянную посуду емкостью не менее 0,5 л отбирают пробу масла из нижнего или специально предусмотренного крана в баке трансформатора. Чтобы удалить из масла

воздушные включения, ему перед пробоем дают отстояться в разряднике в течение 20 мин. Затем плавно повышают напряжение на электродах до пробоя и одновременно наблюдают за стрелкой киловольтметра, показывающего напряжение, при котором происходит пробой. Всего делают шесть пробоев с интервалами 10 мин. Первый пробой не учитывают. Среднее арифметическое пробивного напряжения остальных пяти пробоев принимают за пробивное напряжение, которое должно быть 25 кВ при напряжении трансформатора до 15 кВ включительно и 30 кВ при напряжении трансформатора от 15 до 35 кВ.

На некоторых предприятиях выполняют хромотографический анализ трансформаторного масла. По результатам этих испытаний в протокол записываются неисправности трансформатора.

Если в трансформаторе изменился уровень масла, то проводят следующие испытания масла:

- а) уровень масла в трансформаторе в пределах маслоуказателя расширителя. На кранах и пробке для отбора масла все пломбы целы.
- б) масло без следов воды, а пробивное напряжение его в соответствии с нормой ([см. таблицу 10.1.1](#)).

Таблица 10.1.1 - Пробивное напряжение трансформаторного масла

Класс изоляции обмоток ВН	Пробивное напряжение, кВ
до 15 кВ	25
до 35 кВ	30
более 35 кВ	30

- в) величина коэффициента абсорбции при температуре от 10 до 30°C, должна быть не менее 1,3.
- г) если уровень масла ниже отметок маслоуказателя, но обмотки и переключатель напряжения покрыты маслом, или пробивное напряжение снижается более чем на 5 кВ по сравнению с допустимым, то дополнительно измеряют отношение C_2/C_{50} или $\text{tg}\delta$ обмоток в масле. Допустимые наибольшие значения отношения C_2/C_{50} обмоток представлены в [таблице 10.1.2](#).

Таблица 10.1.2 - Допустимые значения отношения C_2/C_{50}

Класс напряжения первичной обмотки до 35 кВ включительно	Температура обмоток, °C		
	10	20	30
C_2/C_{50}	1,1	1,2	1,3

Если отношение C_2/C_{50} не удовлетворяет требованиям таблицы 2, то необходимо проверить $\text{tg}\delta$. Наибольшие допустимые значения которого, для трансформаторов напряжением до 35 кВ включительно и мощностью не более 2500 кВА, приведены в [таблице 10.1.3](#).

Если производится ревизия трансформатора со сливом масла, то измеряется отношение $\Delta C/C$, допустимые значения которого приведены в [таблице 10.1.4](#).

Таблица 10.1.3 - Допустимые значения $\text{tg}\delta$

Класс напряжения первичной обмотки до 35 кВ включительно	Температура обмоток, °С						
	10	20	30	40	50	60	70
$\text{tg}\delta, \%$	1,5	2,0	2,6	3,4	4,6	6,0	8,0

Таблица 10.1.4 - Допустимые значения отношения $\Delta C/C$

Класс напряжения первичной обмотки до 35 кВ включительно	Температура обмоток, °С				
	10	20	30	40	50
$\Delta C/C, \%$	13	20	30	45	75

Измерение сопротивления обмоток постоянному току. Измерения производятся при помощи моста или метода амперметра-вольтметра. Во избежание ошибок в результате измерений значение тока при этом не должно превышать 20% от его номинальной величины, т.е. $I_{\text{изм}} < 0,2I_{\text{н.тр}}$. Схема измерений приведена на [рисунке 10.1.1](#).

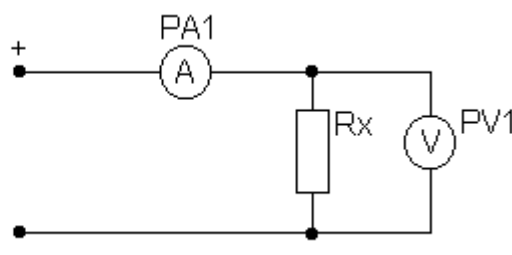


Рисунок 10.1.1 - Схема измерения сопротивления обмоток постоянному току

Сопротивления измеряются между линейными зажимами трансформатора для всех ответвлений и всех фаз. При наличии нулевого провода или доступности начал и концов обмоток измерения производятся пофазно.

На величину сопротивления постоянному току очень сильно влияет температура объекта, которую определяют обычно с помощью жидкостного термометра одновременно с измерениями сопротивления. Пересчет сопротивлений с одной температуры на другую может производиться следующим образом:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{245 + t_2}{245 + t_1} \text{ - для алюминия и } R_2 = R_1 \cdot \frac{235 + t_2}{235 + t_1} \text{ - для медных проводов,}$$

где R_1 и R_2 - сопротивления обмоточных проводов при температурах t_1 и t_2 .

При измерении малых сопротивлений (ниже 1 Ом) необходимо учитывать сопротивление соединяющих проводников $R_{пр}$ и переходное сопротивление контактов ($R_{конт}$).

Измерение сопротивления с помощью двойного моста, амперметра-вольтметра, потенциометра сводится к определению падения напряжения на измеряемом сопротивлении. Поэтому, если потенциальные провода включены так, что они не охватывают токовые провода и контактные соединения, то они не оказывают влияния на результат измерения. Схема, приведенная на [рисунке 10.1.1](#), предназначена для измерения сопротивлений до 1 Ом. Тогда сопротивление обмотки может быть определено из выражения:

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}}, \text{ где } R_v - \text{внутреннее сопротивление вольтметра.}$$

Если сопротивление обмотки более 1 Ом, то оно измеряется по следующей схеме ([см. рисунок 10.1.2](#)):

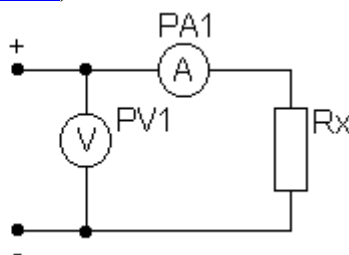


Рисунок 10.1.2 - Схема измерения сопротивлений более 1 Ом

$$R_x = \frac{U - I \cdot R_a}{I}, \text{ где } R_a - \text{внутреннее сопротивление амперметра.}$$

Отсчет необходимо производить при установившемся значении напряжения при токе не более 20% от номинального значения фазного тока. Время достижения установившегося значения достигает в некоторых случаях 10 минут.

Необходимо учитывать, что обмотки трансформатора обладают большой индуктивностью, поэтому нужно при отключении измеряемого тока сначала отключить вольтметр. Кроме того, испытываемая обмотка может быть сама повреждена при отключении больших токов. Поэтому необходимо снизить значение тока до величины не более $0,05I_n$.

Измеренные значения сопротивлений обмоток различных фаз на одноименных ответвлениях не должны отличаться более чем на 2%.

Кроме того должна быть соблюдена одинаковая для всех фаз закономерность измерения сопротивления в различных положениях анцапфы.

Особое внимание следует обратить на измерения сопротивления трансформаторов с регулировкой напряжения под нагрузкой (РПН), где встречаются нарушения закономерностей из-за неправильного сочленения вала переключателя и привода, а также неправильного подключения отпаек обмоток к переключающему устройству.

Измерение токов, потерь холостого хода и короткого замыкания.

Измерение тока холостого хода и потерь производят для выявления таких дефектов в магнитной системе трансформатора, которые увеличивают ток холостого хода и вызывают дополнительные потери, снижающие КПД трансформатора, а в ряде случаев приводят к недопустимому нагреву обмоток и магнитопровода трансформатора.

Измерения тока холостого хода выполняют следующим образом. Подают на обмотку НН симметричное напряжение частотой 50 Гц при разомкнутой обмотке ВН и плавно поднимают от нуля до номинального значения, при этом измеряют ваттметрами мощность, потребляемую трансформатором, а амперметром - линейные токи. Опыт холостого хода можно производить при пониженном напряжении с последующим пересчетом измеренных значений мощности и тока на номинальные напряжения.

В результате ремонта трансформаторов со сменой обмоток могут быть допущены следующие неисправности: неправильная транспозиция проводов, обрыв или надлом одного из параллельных проводов, плохой контакт и применение проводов заниженного сечения. Все они увеличивают омическое сопротивление обмоток и вызывают дополнительные потери в них при нагрузке трансформатора. Перечисленные дефекты обнаруживают по результатам проведения опыта короткого замыкания, сравнивая фактические потери в обмотках с расчетными.

При опыте короткого замыкания выводы стороны НН трансформатора замыкают отрезком шины накоротко, а к выводам ВН подают такое напряжение, при котором в обмотках устанавливается номинальный ток, т. е. напряжение короткого замыкания. В справочных таблицах нагрузочные потери приводятся к температуре обмоток 75°C , поэтому при испытании измеряют температуру обмоток и производят соответствующий пересчет. Полученные при измерении потери короткого замыкания сравнивают с расчетными. Если они больше расчетных, значит, в трансформаторе есть неисправность.

Измерение сопротивления изоляции обмоток. Сопротивление изоляции измеряют мегаомметром между обмоткой ВН и баком при заземленной обмотке НН, обмоткой НН и баком при заземленной обмотке ВН, обмотками ВН и НН, соединенными вместе и с баком. Сопротивление изоляции обмоток трансформатора до 35 кВ считается удовлетворительным, если, будучи измеренным при 20°C , оно не ниже 300 МОм для трансформаторов мощностью до 6300 кВА включительно, и 600 МОм для трансформаторов 10000 кВА и выше.

Испытание электрической прочности главной изоляции повышенным напряжением промышленной частоты. Повышенным

напряжением проверяют электрическую прочность изоляции между обмотками разных напряжений и каждой из них относительно заземленной части трансформатора.

Испытание заключается в том, что от постороннего источника переменного тока через специальный трансформатор подают напряжение на испытываемую обмотку трансформатора, при этом один провод от испытательного трансформатора подключают к соединенным между собой вводам испытываемой обмотки, а другой соединяют с заземленным баком. Вводы второй обмотки испытываемого трансформатора соединяют между собой и заземляют вместе с корпусом. Напряжение плавно повышают от нуля до испытательного с помощью регулировочного трансформатора, подключенного к источнику переменного тока с частотой 50 Гц. Если в течение 1 минуты с момента подачи испытательного напряжения амперметр не показывает увеличения тока, а вольтметр - снижения напряжения и внутри трансформатора не наблюдается разрядов (потрескиваний), напряжение плавно снижают до нуля и считают, что трансформатор выдержал испытание. В таком порядке испытывают вначале обмотки НН, а затем ВН. Напряжение испытания главной изоляции маслонаполненного трансформатора составляет: 25 кВ - при напряжении трансформатора 6 кВ, 35 кВ - при 10 кВ и 85 кВ - при 35 кВ.

Испытание электрической прочности витковой изоляции индуцированным напряжением. Электрическую прочность изоляции между витками, слоями, секциями и фазами проверяют индуцированным напряжением, подаваемым от генератора к обмотке НН при свободной обмотке ВН и заземленном баке трансформатора. Испытательное напряжение принимают равным: 115% номинального - при магнитопроводе шпилечной конструкции, 130% номинального - при бесшпилечной конструкции. Трансформатор считается выдержавшим испытание, если в течение 1 минуты испытательного времени не будут наблюдаться толчки тока, разряды и другие явления, свидетельствующие о повреждении изоляции.

[\(назад\)](#)

10.2 Диагностирование изоляции электрооборудования

10.2.1 Общие положения и правила измерения сопротивления изоляции

В процессе испытаний проводятся многочисленные измерения. Стандарты не предъявляют особо высоких требований к точности электрических измерений при испытании электрических машин, т.к. не имеет смысла, чтобы она была выше точности других измерений. Приборы для измерения сопротивления изоляции могут быть класса "2,5".

Сопротивление изоляции является очень изменчивой величиной, однако это не параметр электрической машины оно только характеризует состояние изоляции в данный момент, и ее измерение имеет одну цель: установить возможность проведения испытаний машины без повышенного риска ее повреждения; однако абсолютных критериев минимально допустимого значения сопротивления изоляции не существует.

Изменчивость сопротивления изоляции определяется тем, что оно сильно зависит от многих факторов, в первую очередь от температуры изоляции и от ее влажности; оба этих фактора понижают ее значение, но если первый можно измерить, то второй никакой количественной оценке не поддается, а качественная оценка второго параметра сама является результатом измерения.

Это измерение проводится мегаомметром, который содержит источник питания постоянного напряжения. Если применяется мегаомметр с генератором постоянного тока, то его ручка должна вращаться непрерывно и равномерно, пока стрелка прибора не установится; при всяком замедлении или перерыве во вращении обмотка разряжается через мегаомметр на корпус, что затягивает измерение, особенно для обмоток крупных машин имеющих значительную емкость.

Сопротивление изоляции машин напряжением до 1000 В включительно надлежит измерять мегаомметром напряжением 1000 В. При напряжении электрических машин в 3000 В и выше могут применяться мегаомметры с более высоким напряжением, например на 2000 В, хотя это не обязательно, а только рекомендуется.

Сопротивление изоляции обмоток электрических машин особо не нормируется. Основным критерием при суждении о допустимом состоянии изоляции обмоток является сравнение сопротивления изоляции в процессе эксплуатации. **Продолжительность измерения сопротивления изоляции должна быть равна одной минуте.**

[\(назад\)](#)

10.2.2 Учет температуры при измерении сопротивления изоляции

Сопротивление изоляции приходится измерять при различных значениях температуры обмотки электрической машины. Однако известно, что сопротивление изоляции сильно зависит от ее температуры, значит полученные значения сопротивления изоляции перед их сравнением и оценкой следует привести к одной температуре.

При температуре 20...30°C сопротивление изоляции обмоток должно быть не меньше определяемого по формуле (но не менее 1,0 Мом у электрических машин напряжением до 1000 В):

$$R_{из} = \frac{U_{ном}}{1000 + P/100},$$

где $U_{ном}$ - номинальное напряжение электрооборудования, В; P - мощность электрооборудования, кВА или кВт.

Для того чтобы привести измеренное значение сопротивления изоляции к температуре 20°C необходимо воспользоваться коэффициентами приведенными в [таблице 10.2.1](#).

Таблица 10.2.1 - Коэффициенты приведения сопротивления изоляции к одной температуре

Разность температур	5	10	15	20	25	30	35	40
Коэффициент приведения	1,23	1,50	1,80	2,25	2,75	3,40	4,15	5,10

Как воспользоваться [таблицей 10.2.1](#)? Рассмотрим это на примере. Допустим измеренное значение сопротивления изоляции при температуре 75 °С равно 1,0 МОм. Нам необходимо определить сопротивление изоляции обмотки при температуре 20 °С.

Для этого найдем разность температур: $\Delta t = t_{\text{изм}} - t_{\text{прив}} = 75 - 20 = 55^\circ\text{C}$. Из [таблицы 10.2.1](#) определим значение коэффициентов приведения, в том случае если разность температур более 40 °С, можно принять два или более коэффициента приведения. В нашем случае 55° можно разбить на две составляющих - 25° и 30°, в первом случае коэффициент приведения равен 2,75, а во втором - 3,40. Тогда общий коэффициент приведения равен $2,75 \cdot 3,40 = 9,35$. Значит, сопротивление изоляции при 20 °С будет равно – $1,0 \cdot 9,35 = 9,35$ МОм.

На практике приблизительно оценить значения сопротивления изоляции можно пользуясь следующим правилом:

В случае измерения сопротивления изоляции при температуре ниже рабочей, сопротивление изоляции следует удваивать на каждые полные или не полные 20°С разности между рабочей температурой и той температурой, при которой выполнялись измерения.

Например: При температуре 75 °С сопротивление изоляции было равно 4,8 МОм. Рабочая температура обмотки равна 20 °С, тогда разность температур $\Delta t = 75 - 20 = 55^\circ\text{C}$. Согласно правилу в этой разности находится 3 полные или неполные 20 °С ($20 + 20 + 15 = 55$). Тогда приведенный результат измерения будет равен:

$$R_{\text{прив}} = R_{20^\circ\text{C}} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 4,8 \cdot 8 = 38,4 \quad \text{МОм.}$$

[\(назад\)](#)

10.2.3 Схемы замещения электрической изоляции электроустановок

Рассмотрим схемы измерения и замещения электрической изоляции, для того чтобы четко уяснить себе, почему измерения сопротивления изоляции производятся именно по предлагаемой методике, а не иначе.

Согласно методике измерения сопротивления изоляции. При измерении сопротивления изоляции одной фазы две другие фазы должны быть заземлены.

В общем случае схему замещения электрической изоляции можно представить в виде, показанном на [рисунке 10.2.1](#).

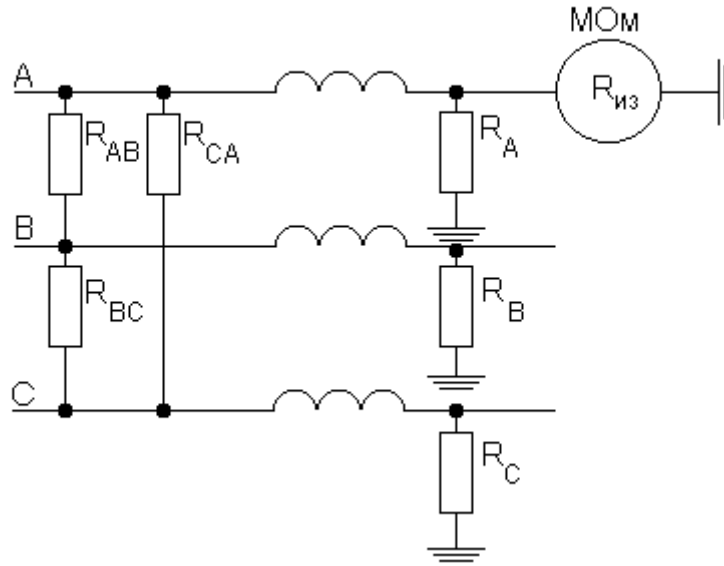


Рисунок 10.2.1 - Схема замещения электрической изоляции в общем виде

Если при измерении сопротивления изоляции одной фазы, например "фазы А", одна из двух других фаз будет заземлена, например "фаза С", то схема замещения приведенная на [рисунке 10.2.1](#) примет следующий вид ([см. рисунок 10.2.2](#)):

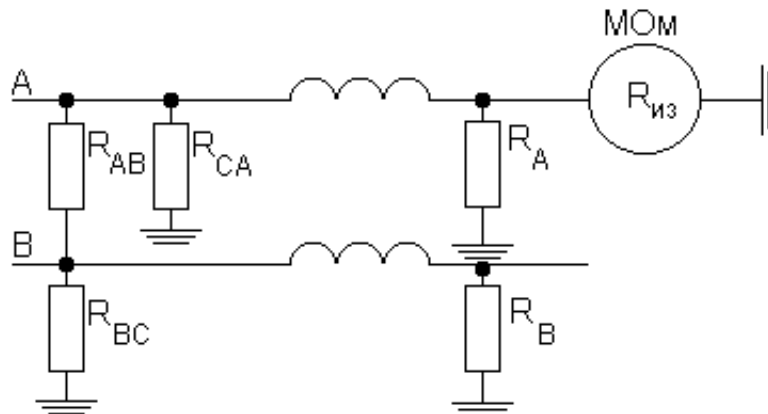


Рисунок 10.2.2 - Схема замещения электрической изоляции при заземленной фазе С

Для схемы замещения представленной на [рисунке 10.2.2](#) можно составить эквивалентную схему замещения, которую удобнее всего использовать для проведения расчетов. Эта эквивалентная схема замещения приведена на [рисунке 10.2.3](#). Для схемы, приведенной на [рисунке 10.2.3](#) можно записать значение эквивалентного сопротивления - R_3 :

$$R_{\text{э}} = \frac{R_A \cdot R_{AC} \cdot (R_B \cdot R_{BC} + R_{AB} \cdot R_{BC} + R_B \cdot R_{AB})}{(R_A + R_{AC}) \cdot (R_B \cdot R_{BC} + R_{AB} \cdot R_{BC} + R_{AB} \cdot R_B) + R_A \cdot R_{AC} \cdot (R_B + R_{BC})}$$

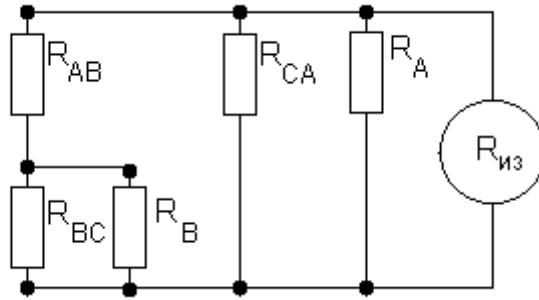


Рисунок 10.2.3 - Эквивалентная схема замещения

В процессе анализа полученного выражения определим, в каком случае оно будет равно "0". Это будет в том случае когда числитель равен нулю, т.е. $R_A \times R_{AC} \times (R_B \times R_{BC} + R_{AB} \times R_{BC} + R_B \times R_{AB}) = 0$, $R_A = 0$; $R_{AC} = 0$ и $(R_B \times R_{BC} + R_{AB} \times R_{BC} + R_B \times R_{AB}) = 0$. Выражение за скобками будет равно нулю только в том случае, если одновременно будут равны нулю R_B и R_{BC} . Однако если только $R_B = 0$, тогда:

$$R_{\text{э}} = \frac{R_A \cdot R_{AC} \cdot R_{AB} \cdot R_{BC}}{(R_A + R_{AC}) \cdot R_{AB} \cdot R_{BC} + R_A \cdot R_{AC} \cdot R_{BC}}, \quad (10.1)$$

Если только $R_{AB} = 0$, тогда:

$$R_{\text{э}} = \frac{R_A \cdot R_{AC} \cdot R_B \cdot R_{BC}}{(R_A + R_{AC}) \cdot R_B \cdot R_{BC} + R_A \cdot R_{AC} \cdot (R_B + R_{BC})}, \quad (10.2)$$

Если только $R_{BC} = 0$, тогда:

$$R_{\text{э}} = \frac{R_A \cdot R_{AC} \cdot R_B \cdot R_{AB}}{(R_A + R_{AC}) \cdot R_{AB} \cdot R_B + R_A \cdot R_{AC} \cdot R_B}. \quad (10.3)$$

Полученные выражения говорят о том, что по результатам замеров можно сделать ошибочный вывод и пропустить неисправность. (т.е. может быть пробой изоляции в фазе "В" на корпус, см. выражение (10.1), и сопротивление изоляции между фазами "А и В" и "В и С" равно нулю, см. выражения (10.2) и (10.3))

Если принять, что у электродвигателей с сухой изоляцией сопротивления $R_A = R_{AC} = R_B = R_{BC} = R_{AB} = R$, то можно записать:

$$R_{\text{э}} = \frac{3}{8} \times R \quad \text{или} \quad R = \frac{8}{3} \times R_{\text{э}} = 2,7 \times R_{\text{э}}$$

Таким образом, при измерении сопротивления изоляции одной из фаз мы измеряем эквивалентное сопротивление изоляции относительно корпуса и других фаз.

Для того, чтобы сделать правильный вывод о состоянии изоляции электрической машины мы должны придерживаться некоторых правил одно из которых необходимо по правилам техники безопасности, а от выполнения другого зависит правильность выводов о состоянии изоляции. Эти правила можно сформулировать следующим образом:

1. Измерения необходимо производить поочередно для каждой электрически независимой цепи, при соединении всех остальных цепей с корпусом.
2. Каждая цепь после измерения сопротивления ее изоляции соединяется с корпусом машины на время не менее 15 секунд при мощности машины до 1000 кВт (или кВА) и не менее 1 минуты при более высокой мощности и не менее 3 минут при применении мегаомметра на 2500 В.

Проверим правильность первого правила. Для этого рассмотрим случаи когда измерения производятся в одной фазе, а две другие фазы заземлены.

Испытание 1. Измерения производятся в фазе "А", а фазы "С" и "В" заземлены. В этом случае схема замещения электрической изоляции примет вид показанный на [рисунке 10.2.4](#).

Для схемы представленной на [рисунке 10.2.5](#) можно записать:

$$R_{ЭА} = \frac{R_A \cdot R_{AC} \cdot R_{AB}}{R_A \cdot R_{AB} + R_{AC} (R_A + R_{AB})}$$

Причиной того, что $R_{ЭА}=0$ может являться то, что R_A ; R_{AC} или R_{AB} равны нулю. Для того, чтобы выяснить какое из сопротивлений равно нулю опыт необходимо проделать не менее трех раз, т.е. для каждой из фаз.

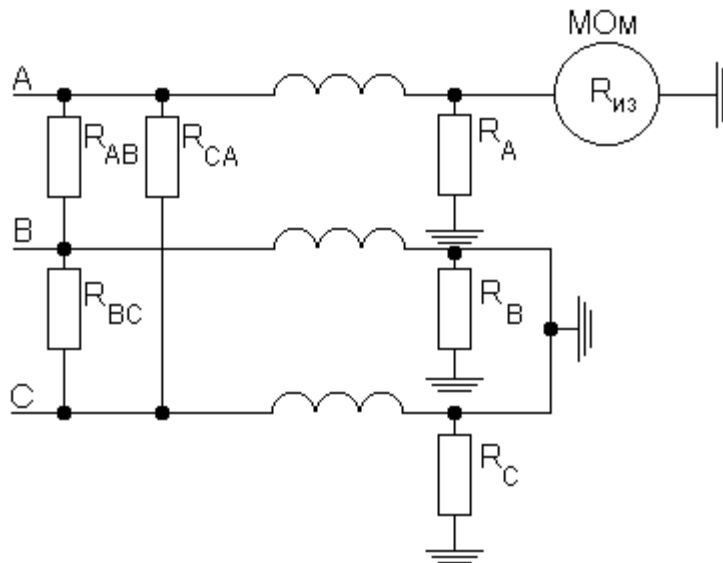


Рисунок 10.2.4 - Схема замещения электрической изоляции при измерении в фазе "А", фазы "В" и "С" заземлены

Для схемы представленной на [рисунке 10.2.4](#) эквивалентная расчетная схема замещения будет иметь вид представленный на [рисунке 10.2.5](#).

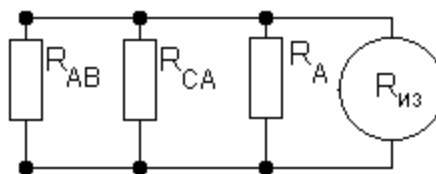


Рисунок 10.2.5 - Эквивалентная расчетная схема замещения

Испытание 2. Измерения производятся в фазе "В", а фазы "С" и "А" заземлены. В этом случае схема замещения электрической изоляции примет вид показанный на [рисунке 10.2.6](#).

Для схемы представленной на [рисунке 10.2.6](#) эквивалентная расчетная схема замещения будет иметь вид представленный на [рисунке 10.2.7](#). Для схемы представленной на [рисунке 10.2.7](#) можно записать:

$$R_{ЭВ} = \frac{R_B \cdot R_{BC} \cdot R_{AB}}{R_B \cdot R_{BC} + R_{AB} \cdot (R_B + R_{BC})}$$

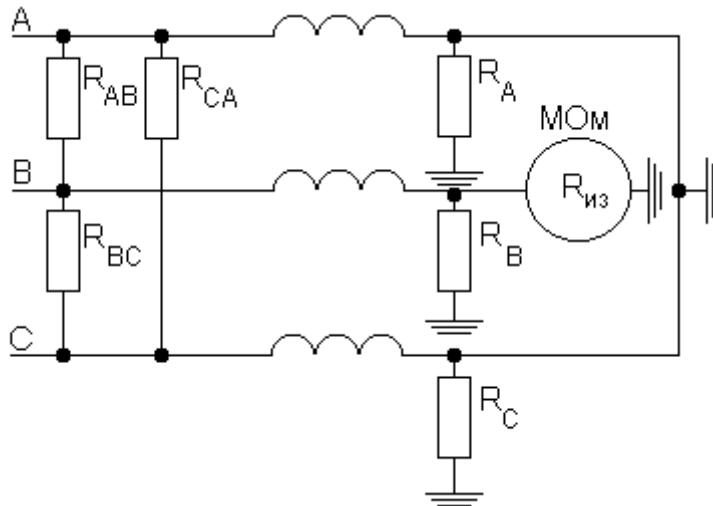


Рисунок 10.2.6 - Схема замещения электрической изоляции при измерении в фазе "В" фазы "А" и "С" заземлены

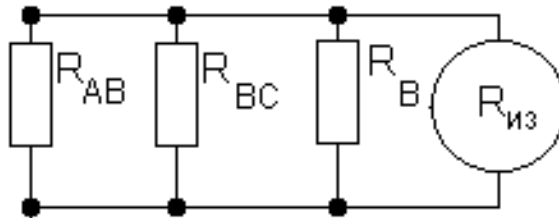


Рисунок 10.2.7 - Эквивалентная расчетная схема замещения

Причиной того, что $R_{ЭВ}=0$ может являться то, что R_B ; R_{BC} или R_{AB} равно нулю. Анализ данных полученных при первом и втором замерах говорит о том,

что $|R_A \cdot R_{AC} \cdot R_{AB}| = 0$, $|R_B \cdot R_{BC} \cdot R_{AB}|$ в этом случае мы видим, что в матрице повторяются две

величины R_{AB} значит $R_{AB} = 0$.

Испытание 3. Измерения производятся в фазе "С", а фазы "В" и "А" заземлены. В этом случае схема замещения электрической изоляции примет вид показанный на [рисунке 10.2.8](#).

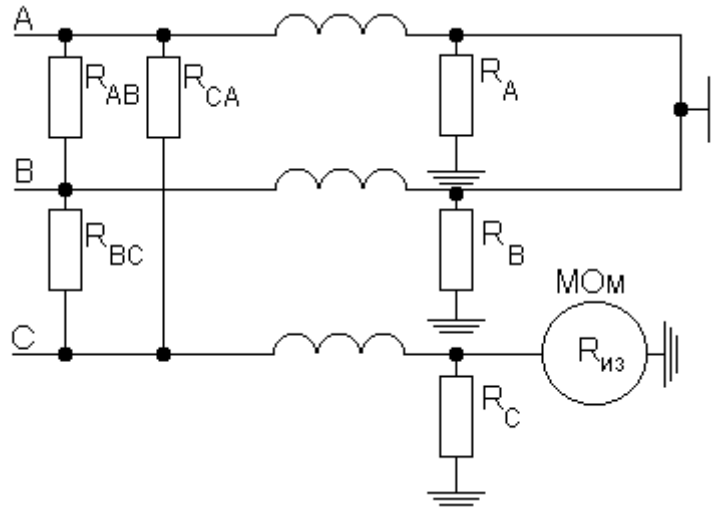


Рисунок 10.2.8 - Схема замещения электрической изоляции при измерении в фазе "С" фазы "А" и "В" заземлены

Для схемы представленной на [рисунке 10.2.8](#) эквивалентная расчетная схема замещения будет иметь вид представленный на [рисунке 10.2.9](#).

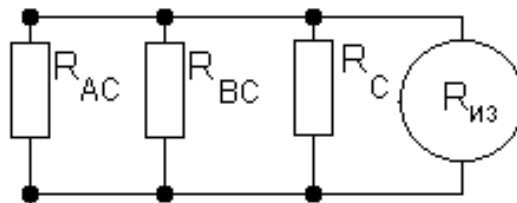


Рисунок 10.2.9 - Эквивалентная расчетная схема замещения

Для схемы представленной на [рисунке 10.2.9](#) можно записать:

$$R_{\text{ЭС}} = \frac{R_C \cdot R_{BC} \cdot R_{AC}}{R_C \cdot R_{BC} + R_{AC}(R_C + R_{BC})}$$

Причиной того, что $R_{\text{ЭС}}=0$ может являться то, что R_C ; R_{BC} или R_{AC} равно нулю. Анализ данных полученных при первом, втором и третьем замерах говорит о том, что если при трех замерах мы получили результаты равные нулю т.е.

$$\begin{aligned} R_{\text{ЭА}} &= |R_A \cdot R_{AB} \cdot R_{AC}| \\ R_{\text{ЭВ}} &= |R_B \cdot R_{BC} \cdot R_{AB}| = 0, \\ R_{\text{ЭС}} &= |R_C \cdot R_{BC} \cdot R_{AC}| \end{aligned} \quad (10.4)$$

в этом случае мы видим, что в матрице повторяются по две величины R_{AB} , R_{BC} и R_{AC} значит можно сделать вывод, что сопротивление изоляции между фазами равно нулю.

Если в результате трех измерений мы получили, что только два замера равны нулю, например, $R_{\text{ЭС}}$ и $R_{\text{ЭВ}}$ равны нулю, то это говорит о том, что $R_{BC}=0$. Если в результате измерений мы получили, что, например, $R_{\text{ЭС}}=0$, то это говорит о том, что фаза "С" имеет замыкание на корпус.

Испытание 4. Для определения того, какая из фаз имеет замыкание на корпус измерение необходимо производить по схеме приведенной на [рисунке 10.2.10](#).

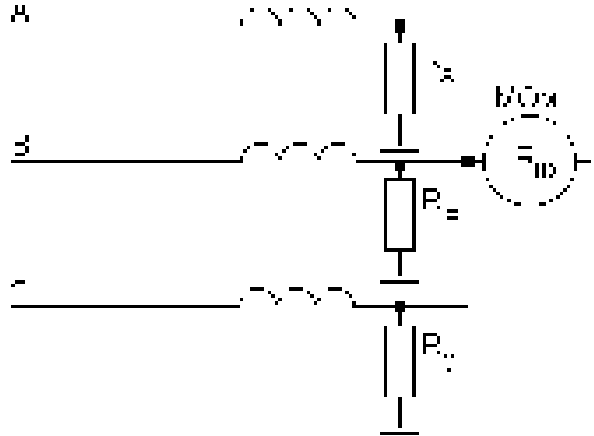


Рисунок 10.2.10 - Схема измерений для определения того, какая из фаз замкнута на корпус

При такой схеме соединения сопротивления R_{AB} , R_{BC} и R_{AC} зашунтированы и не оказывают влияние на результат измерения. Тогда $R_{Э4}$ можно записать в следующем виде:

$$R_{Э4} = \frac{R_A \cdot R_B \cdot R_C}{R_A \cdot R_B + R_C(R_A + R_B)}$$

$R_{Э4}=0$ если одно из сопротивлений R_A , R_B или R_C равно нулю. Т.е. для оценки состояния сопротивления изоляции необходимо провести измерения по схемам, приведенным на рисунках [10.2.4](#), [10.2.6](#) и [10.2.10](#) или [10.2.4](#), [10.2.8](#) и [10.2.10](#) или [10.2.6](#), [10.2.8](#) и [10.2.10](#).

Сопротивление изоляции может быть обусловлено: увлажнением изоляции; загрязнением изоляции.

40% электродвигателей сдается в ремонт только из-за увлажненной или загрязненной изоляции. Как определить из-за чего снизилось сопротивление изоляции? Для этого необходимо поменять полярность подключения мегаомметра, если при этом значение сопротивления изоляции НЕ ИЗМЕНИТСЯ, то уменьшение сопротивления изоляции вызвано ее загрязнением. Если сопротивление изоляции изменится, то ее снижение вызвано увлажнением изоляции электродвигателя.

[\(назад\)](#)

10.2.4 Способы определения степени увлажнения изоляции

Степень увлажнения изоляции можно определить следующими способами:

- по значению коэффициента абсорбции;
- по отношению C_2/C_{50} ;
- по отношению $\Delta C/C$;
- по значению тангенса угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$.

Теперь рассмотрим эти способы более подробно.

Проверка увлажнения изоляции по значению коэффициента абсорбции. Со степенью увлажнения изоляции связана продолжительность установления показаний мегаомметра при измерении сопротивления изоляции. Эта продолжительность тем больше, чем меньше влаги содержится в изоляции. Данный эффект и положен в основу оценки степени увлажнения и называется методом абсорбции.

Коэффициентом абсорбции называется отношение двух показаний мегаомметра R_{60} - по истечению 60 секунд после начала измерения и R_{15} - по истечению 15 секунд после начала измерения:

$$K_{аб.} = \frac{R_{60}}{R_{15}}.$$

Изоляция считается достаточно сухой, если $K_{аб.} > 1,3$ и изоляция считается увлажненной если $K_{аб.} < 1,3$. Это объясняется различной длительностью разряда абсорбционной емкости у сухой и влажной изоляции.

Определение влажности изоляции по методу "емкость-частота". Этот метод основан на том, что емкость неувлажненной изоляции при изменении частоты изменяется меньше (или совсем не изменяется), чем у увлажненной изоляции.

Емкость измеряют при частоте $f=2$ Гц (C_2) и емкость при частоте $f=50$ Гц (C_{50}).

При измерении емкости изоляции на частоте 50 Гц успевает проявиться только геометрическая емкость, одинаковая у сухой и влажной изоляции, а при измерении емкости изоляции на частоте 2 Гц успевает проявиться абсорбционная емкость влажной изоляции, в то время как у сухой изоляции она меньше и заряжается медленнее.

На [рисунке 10.2.11](#) приведена схема измерения емкостей C_2 и C_{50} при помощи прибора ПКВ-7.

Если в процессе измерения мы получили, что отношение $C_2/C_{50}=2$ то изоляция увлажнена. А если в процессе измерений получено, что $C_2/C_{50}=1$, то изоляция считается сухой. Измерение влажности обмоток по методу емкость-частота производят для маслонаполненных электрических машин. Измерения производят приборами контроля влажности типа "ПКВ" между каждой обмоткой и корпусом при заземленных свободных концах обмоток. Прибором контроля влажности пользуются при сопротивлении изоляции более 15 МОм и при температуре окружающей среды от 10 до 30°C. Если эти условия измерений нарушаются, то ошибка измерений становится более 10%.

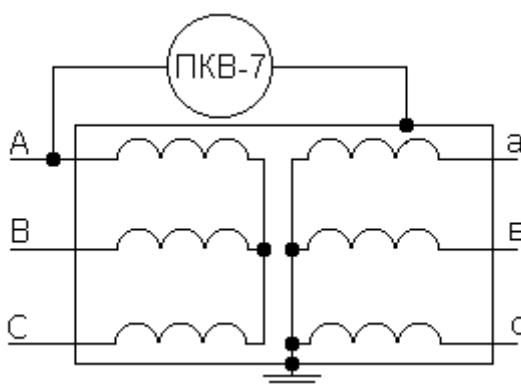


Рисунок 10.2.11 - Измерение влажности изоляции при помощи прибора ПКВ-7

Определение влажности по приросту емкости за 1 секунду ($\Delta C/C$) производят следующим образом. Заряжают емкость изоляции и затем ее разряжают, измеряют емкость объекта - "С" и прирост емкости " ΔC " в течение одной секунды за счет абсорбционной емкости, которая успевает проявить себя за 1 секунду у увлажненной изоляции и не успевает проявить себя у сухой изоляции.

Отношение $\Delta C/C$ характеризует увлажненность изоляции. Оно является функцией температуры. Это отношение можно измерить прибором типа "ЕВ" или "ПКВ". Этот метод применяют для определения влажности у "сухих" электрических машин.

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции. Диэлектрические потери мощности или пропорциональный им тангенс угла диэлектрических потерь одна из основных характеристик состояния электрической изоляции. Нарисуем векторную диаграмму, характеризующую расположение векторов тока утечки и напряжения. Эта векторная диаграмма приведена на [рисунке 10.2.12](#).

Тангенс угла диэлектрических потерь, как видно из диаграммы, есть отношение активной составляющей тока утечки " I_a " к его реактивной составляющей " I_c ":

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c},$$

$$\text{Отсюда емкостной ток } I_c = \frac{U}{X_c} = U \cdot \omega \cdot C,$$

где ω - угловая частота, $2\pi \times f$; C - емкость конденсатора; U - напряжение, В.

Мощность, теряемая в конденсаторе из-за токов утечки:

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega \cdot c \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = K \cdot \operatorname{tg} \delta, \text{ т.е. } P = \operatorname{tg} \delta.$$

Значит мощность, теряемая на токи утечки через изоляцию, пропорциональна тангенсу угла диэлектрических потерь. По току " I_a " нельзя судить о потерях, так как активная составляющая тока утечки является функцией геометрических размеров образца изоляции. Отношение активной составляющей тока утечки к емкостной (I_a/I_c) является функцией величины сопротивления изоляции. Для измерения тангенса угла диэлектрических потерь

можно воспользоваться мостами МД-16, Р-525 и другими мостовыми приборами.

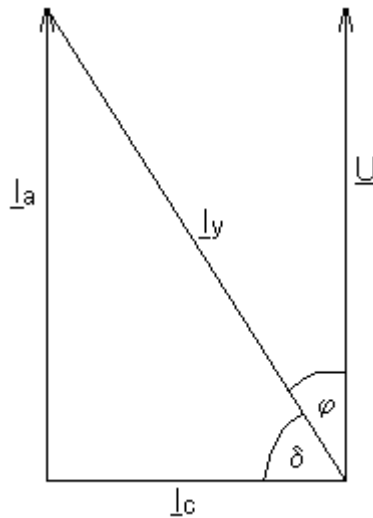


Рисунок 10.2.12 - Векторная диаграмма токов утечки увлажненной изоляции

[\(назад\)](#)

10.2.5 Испытание изоляции повышенным напряжением переменного тока

Эти испытания позволяют определить запас прочности изоляции, отсутствие местных и других дефектов не обнаруженных другими способами. Испытания повышенным напряжением обязательны для устройств на напряжение до 35 кВ включительно. ПУЭ регламентирует величины испытательных напряжений и они приведены в [таблице 10.2.2](#).

Таблица 10.2.2 - Значения испытательных напряжений

Номинальное напряжение, кВ	до 0,69	3,0	6,0	10,0	15,0	20,0	35,0
Испытательное напряжение, кВ	4,5	16,2	22,5	31,5	40,5	49,5	76,5
	2,7	9,0	15,4	21,6	33,3		

Примечание: в числителе приведены значения напряжений для нормальной изоляции, а в знаменателе - для облегченной изоляции.

Различают два вида испытаний:

1. испытания главной изоляции обмоток трансформаторов повышенным напряжением относительно корпуса и другой обмотки (ВН и НН);
2. испытания повышенным напряжением изоляции витков.

В условиях эксплуатации проводят испытания главной изоляции. Частота испытательного тока равна 50 Гц, температура изоляции при испытаниях равна температуре окружающей среды, время испытаний должно быть равно 1 минуте. В течение одной минуты испытательное напряжение не сказывается на состоянии изоляции, не имеющей дефектов и этого времени достаточно для того, чтобы осмотреть находящуюся под напряжением изоляцию.

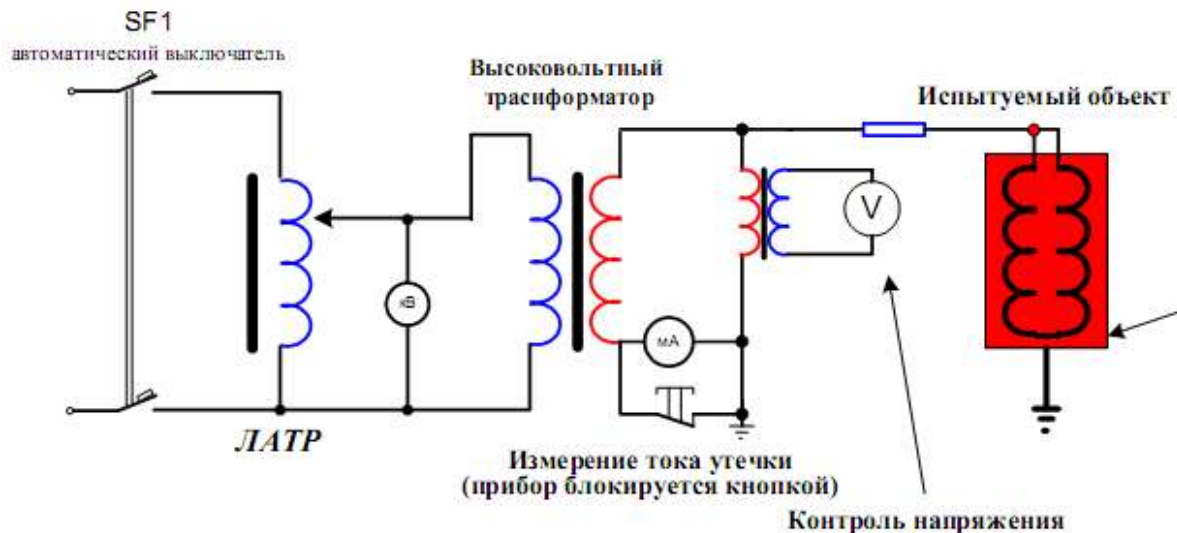


Рисунок 10.2.13 – Схема испытания электрической машины повышенным напряжением промышленной частоты

В начале испытания на обмотку подают напряжение, равное одной третьей испытательного напряжения ($0,33U_{исп}$), с любой скоростью нарастания. В дальнейшем испытательное напряжение повышают плавно со скоростью, допускающей визуальное наблюдение за приборами. После установленной продолжительности испытания напряжение плавно снижается до одной трети испытательного и отключается.

Под продолжительностью испытания понимается время приложения испытательного напряжения.

Для защиты соответствующих объектов от случайного опасного повышения напряжения параллельно испытуемому объекту включаются шаровые разрядники с пробивным напряжением:

$$U_{проб} = 1,1 \cdot U_{исп}.$$

Другими словами шаровые разрядники предназначены для защиты от влияния высших гармоник при испытаниях повышенным напряжением.

[\(назад\)](#)

10.2.6 Прогнозирование технического состояния оборудования по результатам измерения сопротивления изоляции

Методика предварительной оценки состояния изоляции электротехнического оборудования по результатам измерений. По результатам измерений сопротивления изоляции можно определить момент ожидаемого наступления предельного состояния изоляции. Рассмотрим эту методику на примерах.

Пример 1. Сопротивление изоляции участка электрической сети напряжением 220В в момент проведения измерений оказалась равным 4 МОм. Три последующих измерения были сделаны с интервалом в 6 месяцев и показали следующие значения: 3,4; 2,8; 2,2 МОм. Нам надо определить

скорость изменения параметра и момент ожидаемого наступления предельного состояния изоляции.

1) Скорость изменения параметра технического состояния:

$$V = \frac{(4 - 3,4) + (3,4 - 2,8) + (2,8 - 2,2)}{6 \times 3} = 0,1 \quad \left[\frac{\text{МОм}}{\text{мес}} \right].$$

2) Момент наступления предельного состояния (он определяется минимально допустимым значением сопротивления изоляции 1МОм, согласно требованиям ПТЭ и ПТБ):

$$T = \frac{2,2 - 1}{0,1} = 12 \quad \text{мес}$$

Через 12 месяцев состояние изоляции данного участка электрической сети окажется не удовлетворяющим установленным требованиям. По истечении указанного периода времени данный участок подлежит ремонту.

Пример 2. В результате измерения сопротивления изоляции электродвигателя были получены следующие значения:

Номер измерения, N_i	1	2	3	4	5
Результат измерения, R_i , МОм	100	75	50	30	10

Измерения производились один раз в месяц. Определим скорость изменения параметра и момент ожидаемого наступления предельного состояния изоляции.

1) Скорость изменения параметра технического состояния:

$$V = \frac{(100 - 75) + (75 - 50) + (50 - 30) + (30 - 10)}{1 \times 4} = 22,5 \quad \left[\frac{\text{МОм}}{\text{мес}} \right].$$

2) Момент наступления предельного состояния (он определяется минимально допустимым значением сопротивления изоляции 0,5 МОм, согласно требованиям ПТЭ и ПТБ):

$$T = \frac{10 - 0,5}{22,5} = 0,4 \quad \text{мес}$$

При такой скорости изменения сопротивления изоляции предельное состояние изоляции электродвигателя наступит через 0,4 месяца. Это необходимо иметь ввиду при составлении плана ремонта оборудования.

В общем виде скорость изменения параметра технического состояния может быть определено из выражения:

$$V = \frac{(R_{из1} - R_{из2}) + (R_{из2} - R_{из3}) + \dots + (R_{из(n-1)} - R_{изn})}{t \times n}, \quad \left[\frac{\text{МОм}}{\text{мес}} \right],$$

где $R_{из1}$, $R_{из2}$, $R_{из3}$, $R_{из(n-1)}$, $R_{изn}$ - результаты измерений сопротивления изоляции, МОм;

t - интервал времени, через который проводились измерения, месяц;

n - количество измерений, не считая первое.

В общем виде момент наступления предельного состояния (он определяется минимально допустимым значением сопротивления изоляции для

данного вида оборудования, согласно требованиям ПТЭ и ПТБ) может быть определен из выражения:

$$T = \frac{R_{изп} - R_{изГОСТ}}{V}, \quad мес,$$

где $R_{изп}$ - результат последнего измерения сопротивления изоляции, МОм;

$R_{изГОСТ}$ - допустимое значение сопротивления изоляции электрооборудования согласно требованиям ГОСТа.

[\(назад\)](#)

10. ВЫВОДЫ

На основании рассчитанных обмоточных данных делаются выводы о соответствии полученных значений каталожным и производится анализ результатов расчетов.

[\(назад\)](#)

ЛИТЕРАТУРА

1. Эксплуатация электрооборудования: Учебник/ А.П. Ерошенко, М.А. Таранов. – М.: КолосС, 2005. – 344 с.: ил. – (Учебники и учеб. пособия для студентов вузов). - Библиогр.: с. 337. – Прил. : с. 332-336. – Доп. М-вом сельского хозяйства РФ. – ISBN 5-9532-0386-1: 207-00.

2. Эксплуатация энергооборудования сельскохозяйственных предприятий: Учебник для вузов / Г.П. Ерошенко, Ю.А. Медведько, М.А. Таранов. – Ростов-на-Дону: Терра, 2006. – 592 с. – Библиогр.: с. 587-591. – Доп. М-вом сельского хозяйства РФ. – ISBN 5-98254-060-9: 270-30.

3. Эксплуатация систем электроснабжения: учебник / М.А. Таранов, В.Я. Хорольский. – Ростов-на-Дону: Терра-Принт, 2007. – 320 с. – Библиогр.: с. 319-320. – Доп. М-вом с/х РФ. – ISBN 987-5-903286-21-8: 175-80. 175-80.

4. Эксплуатация электрооборудования: учебник / Г.П. Ерошенко, М.А. Таранов. – М.: КолосС, 2008. – 344 с.: ил. – (Учебники и учеб. пособие для студентов вузов). – Библиогр.: с.337. – Прил.: с. 332-336. – Доп. М-вом сельского хозяйства РФ. – ISBN 978-5-9532-0526-9: 275-00.

5. Эксплуатация электрооборудования: учебное пособие / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов, В.Н. Шемякин. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2010. – 328 с. – Библиогр.: с. 322-323. – Доп. М-вом сельского хозяйства РФ. - ISBN 978-5-91833-007-4: 177-00. – 177-00. – 177-00.

6. Эксплуатация систем электроснабжения: учебное пособие / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2013. – 288 с. – (Высшее образование. Бакалавриат). – Библиогр.: с. 282-283. – Доп. М-вом сельского хозяйства РФ. - ISBN 978-5-91134-797-0 (ФОРУМ): 410-00.

[\(назад\)](#)

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ЭСКИЗЫ ДЕТАЛЕЙ МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА

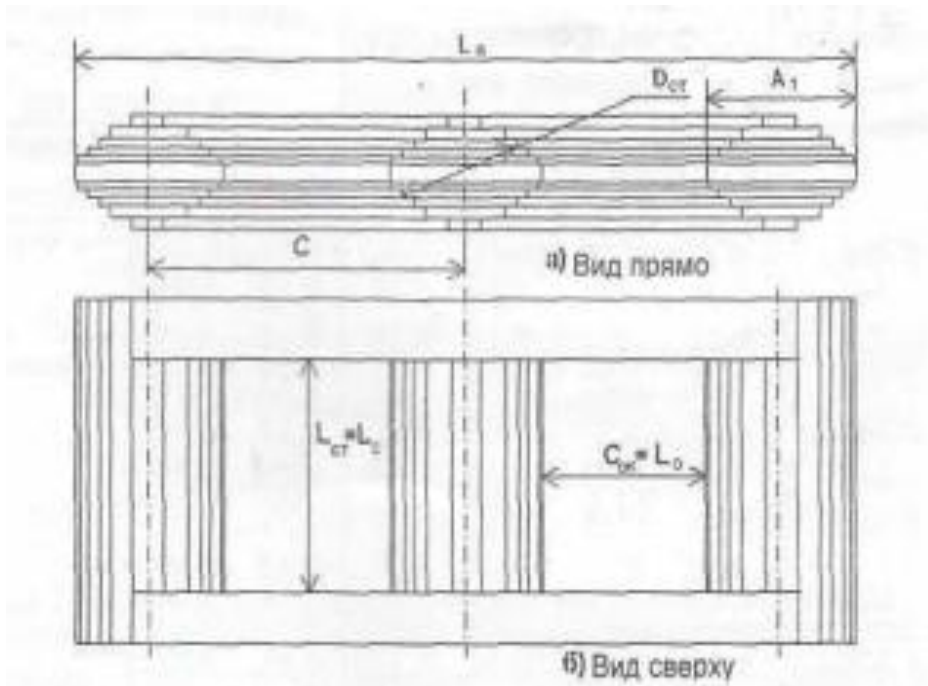


Рисунок А1 – Эскиз магнитопровода трансформатора:

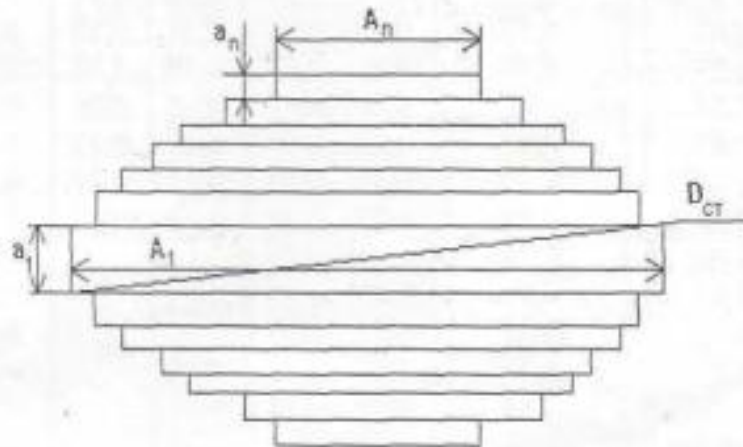


Рисунок А2 – Эскиз стержня трансформатора

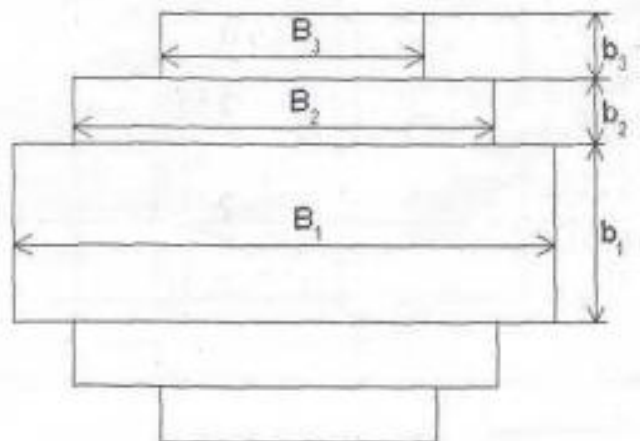


Рисунок А3 – Эскиз ярма трансформатора

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б1 – Размеры круглого обмоточного провода

Диаметр проводника без изоляции, мм	Сечение проводника без изоляции, мм ²	Номинальная толщина изоляции в зависимости от ее вида, мм			
		волокнистая	стеклово- локнистая	эмалевово- локнистая	пленочно- волокнистая
0,80 м	0,503	0,18...0,22	0,16...0,25	0,12...0,28	
0,85 м	0,567	0,18...0,22	0,16...0,25	0,12...0,28	
0,90 м	0,636	0,18...0,22	0,16...0,25	0,12...0,28	
0,95 м	0,709	0,18...0,22	0,16...0,25	0,12...0,28	
1,00 м	0,785	0,20...0,27	0,18...0,27	0,13...0,37	
1,06 м	0,882	0,20...0,27	0,18...0,27	0,13...0,37	
1,12 м	0,985	0,20...0,27	0,18...0,27	0,13...0,37	
1,18 м	1,093	0,20...0,27	0,18...0,27	0,13...0,37	
1,25 м	1,230	0,20...0,27	0,18...0,27	0,13...0,37	
1,32 м,а	1,370	0,20...0,27	0,18...0,27	0,13...0,37	
1,40	1,54	0,27	0,18...0,27	0,14...0,37	0,55...0,66
1,50	1,77	0,27	0,18...0,27	0,14...0,37	0,55...0,66
1,60	2,01	0,27	0,20...0,33	0,16...0,37	0,55...0,66
1,70	2,27	0,27	0,20...0,33	0,16...0,37	0,55...0,66
1,80	2,54	0,27	0,20...0,33	0,16...0,37	0,55...0,66
1,90	2,83	0,27	0,20...0,33	0,16...0,37	0,55...0,66
2,00	3,14	0,27	0,20...0,33	0,16...0,37	0,55...0,66
2,12	3,53	0,27	0,20...0,33	0,16...0,37	0,55...0,66
2,24	3,94	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
2,36	4,37	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
2,50	4,91	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
2,65	5,51	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
2,80	6,15	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
3,00	7,07	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
3,15	7,79	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
3,35	8,81	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
3,55	9,89	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
3,75	11,04	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
4,00	12,56	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
4,25	14,18	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
4,50	15,90	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
4,75	17,71	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
5,00	19,63	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
5,30 а	22,05	0,33	0,27...0,33		0,55...0,66
6,00 а	28,26	0,35			
8,00 а	50,24	0,35			

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В1 – Номинальная толщина бумажной изоляции круглых проводов

Номинальный диаметр проволоки, мм	Номинальная толщина изоляции, мм
1,18...2,12	0,30; 0,55; 0,72; 0,96; 1,20
2,24...3,55	0,30; 0,72; 0,96; 1,20; 1,68; 1,92
>3,55	0,30; 0,72; 0,96; 1,20; 1,68; 1,92; 2,88; 4,08; 5,76

Примечание. Номинальную удвоенную толщину бумажной изоляции круглых проводов выбирают из ряда, указанного в таблице В1.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Номинальная ширина проволоки, «b», мм	Расчетное сечение проволоки в мм ² в зависимости от номинальной толщины проволоки «h», мм																		
	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40	1,60	1,80	2,00	2,24	2,50	2,80	3,15	3,55	4,00	4,50	5,00	5,60	
2,00	1,463	1,626	1,785	2,025	2,285	2,585													
2,24	1,655	1,842	1,025	2,294	2,585	2,921	3,369												
2,50	1,863	2,076	2,285	2,585	2,910	3,285	3,785	4,137											
2,80	2,103	2,346	2,585	2,921	3,285	3,705	4,265	4,677	5,237										
3,15	2,383	2,661	2,935	3,313	3,723	4,195	4,825	5,307	5,937	6,693									
3,55	2,703	3,021	3,355	3,761	4,223	4,755	5,465	6,027	6,737	7,589	8,326								
4,00	3,063	3,426	3,785	4,265	4,785	5,385	6,185	6,837	7,637	8,597	9,451	10,65							
4,50	3,463	3,867	4,285	4,825	5,410	6,085	6,985	7,737	8,637	9,717	10,70	12,05	13,63						
5,00	3,863	4,326	4,785	5,385	6,035	6,785	7,785	8,637	9,637	10,84	11,95	13,45	15,20	17,20					
5,60	4,343	4,866	5,385	6,057	6,785	7,625	8,745	9,717	10,84	12,18	13,45	15,13	17,09	19,33	21,45				
6,30	4,903	5,496	6,085	6,841	7,660	8,605	9,865	10,98	12,24	13,75	15,20	17,09	19,30	21,85	24,34	27,49			
7,10		6,216	6,885	7,737	8,660	9,725	11,15	12,42	13,84	15,54	17,20	19,33	21,82	24,66	27,54	31,09	34,64		
8,00			7,785	8,745	9,785	10,99	12,59	14,04	15,64	17,56	19,45	21,85	24,65	27,85	31,14	35,14	39,24	43,94	
9,00				9,865	11,04	12,39	14,19	15,84	17,64	19,80	21,95	24,65	27,80	31,40	35,14	39,64	44,14	49,54	
10,00					12,29	13,79	15,79	17,64	19,64	22,04	24,45	27,45	30,95	34,95	39,14	44,14	49,14	55,14	
11,20						15,47	17,71	19,80	22,04	24,73	27,45	30,31	34,73	39,21	43,94	49,54	55,14	61,86	
12,50							19,79	22,14	24,64	27,54	30,70	34,45	38,83	43,83	49,14	52,24	58,14	69,14	
14,00								24,84	27,64	31,00	34,45	38,65	43,55	49,15	55,14	58,54	69,14	77,54	
15,00									29,64	33,24	36,95	41,45	46,70	52,70	59,14	62,14	74,14	83,14	
16,00									31,64	33,48	39,45	44,25	49,85	56,25	63,14	66,64	79,14	88,74	
18,00																71,14			
20,00											49,52				79,52		99,14		

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Исходные данные для расчета трансформаторов

№	C	L _c	C _{ок}	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	B ₁	B ₂	B ₃	B ₁	B ₂	B ₃	U ₁	Схема, группа	
-	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	В	26
1	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	35	Y/Y _{H-0}	
2	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	35	Y/Y _{H-0}	
3	270	535	165	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	75		55	23		20	Y/Z _{H-11}	
4	325	624	210	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		115	95		58	25		20	Y/Z _{H-11}	
5	255	434	150	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	85		69	14		10	Y/Z _{H-11}	
6	270	520	155	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		120	85		58	25		10	Y/Z _{H-11}	
7	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	35	Y/Y _{H-0}	
8	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	6	47	20	Y/Y _{H-0}	
9	400	765	245	155	135	120	105	85	55		40	23	10	8	7	7		155	135	105	40	23	32	20	Y/Z _{H-11}	
10	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	20	Y/Y _{H-0}	
11	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		20	Y/Y _{H-0}	
12	420	723	215	195	175	155	120	95	65		78	36	34	22	18	13		195	175	120	78	70	53	6	Y/Y _{H-0}	
13	375	745	240	135	120	105	95	75	55		36	18	10	5	8	5		135	105		38	46		20	Y/Y _{H-0}	
14	375	745	240	135	120	105	95	75	55		36	18	10	5	8	5		135	105		38	46		35	Y/Z _{H-11}	
15	375	745	240	135	120	105	95	75	55		36	18	10	5	8	5		135	105		38	46		35	Y/Y _{H-0}	
16	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	6	Y/Y _{H-0}	
17	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	6	Y/Z _{H-11}	
18	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	10	Y/Y _{H-0}	
19	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	10	Y/Z _{H-11}	
20	400	765	245	155	135	120	105	85	55		40	23	10	8	7	7		155	135	105	40	23	32	20	Y/Y _{H-0}	
21	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		35	Y/Y _{H-0}	
22	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		6	Y/Z _{H-1}	
23	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	6	Y/Y _{H-0}	
24	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	10	Y/Y _{H-0}	
25	400	765	245	155	135	120	105	85	55		40	23	10	8	7	7		155	135	105	40	23	32	20	Y/Y _{H-0}	
26	400	765	245	155	135	120	105	85	55		40	23	10	8	7	7		155	135	105	40	23	32	35	Y/Y _{H-0}	
27	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		6	Y/Y _{H-0}	

Продолжение приложения Д

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
28	420	723	215	195	175	155	120	95	65		78	36	34	22	18	13		195	175	120	78	70	53	10	Y/Z _{H-11}
29	255	434	150	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	85		69	14		10	Y/Z _{H-11}
30	270	535	165	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	75		55	23		20	Y/Z _{H-11}
31	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		10	Y/Z _{H-1}
32	270	520	155	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		120	85		58	25		10	Y/Y _{H-0}
33	325	624	210	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		115	95		58	25		20	Y/Y _{H-0}
34	325	624	210	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		115	95		58	25		35	Y/Y _{H-0}
35	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	6	Y/Y _{H-0}
36	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	10	Y/Y _{H-0}
37	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	20	Y/Z _{H-11}
38	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	35	Y/Y _{H-0}
39	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	35	Y/Z _{H-11}
40	420	723	215	195	175	155	120	95	65		78	36	34	22	18	13		195	175	120	78	70	53	6	Y/Y _{H-0}
41	420	723	215	195	175	155	120	95	65		78	36	34	22	18	13		195	175	120	78	70	53	6	Y/Z _{H-11}
42	420	723	215	195	175	155	120	95	65		78	36	34	22	18	13		195	175	120	78	70	53	10	Y/Y _{H-0}
43	420	723	215	195	175	155	120	95	65		78	36	34	22	18	13		195	175	120	78	70	53	10	Y/Z _{H-11}
44	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		20	Y/Z _{H-11}
45	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		35	Y/Z _{H-11}
46	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	6	47	20	Y/Z _{H-11}
47	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		6	Y/ Δ_1
48	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	6	47	35	Y/Z _{H-11}
49	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		6	Y/Y _{H-0}
50	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		10	Y/Y _{H-0}
51	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	10	Y/Y _{H-0}
52	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	10	Y/Y _{H-0}
53	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		10	Y/Y _{H-0}
54	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		10	Y/ Δ_1
55	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	6	Y/Z _{H-11}
56	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	10	Y/Z _{H-11}

Продолжение приложения Д

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
57	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	20	Y/Y _{H-0}
58	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	6	47	20	Y/Y _{H-0}
59	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	35	Y/Z _{H-11}
60	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	6	Y/ Δ_{-1}
61	400	765	245	155	135	120	105	85	55		40	23	10	8	7	7		155	135	105	40	23	32	35	Y/Z _{H-11}
62	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		35	Y/Y _{H-0}
63	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	10	Y/ Δ_{-11}
64	255	434	150	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	85		69	14		6	Y/Z _{H-11}
65	270	535	165	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	75		55	23		10	Y/Z _{H-11}
66	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	20	Y/Y _{H-0}
67	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	6	Y/Y _{H-0}
68	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	10	Y/Y _{H-0}
69	270	535	165	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	75		55	23		35	Y/Z _{H-11}
70	325	624	210	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		115	95		58	25		6	Y/Z _{H-11}
71	255	434	150	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	85		69	14		20	Y/Z _{H-11}
72	270	520	155	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		120	85		58	25		35	Y/Z _{H-11}
73	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	26	47	6	Y/Y _{H-0}
74	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		10	Y/Z _{H-11}
75	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		20	Y/Z _{H-1}
76	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		35	Y/Z _{H-11}
77	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	10	Y/Y _{H-0}
78	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		6	Y/ Δ_{-1}
79	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		10	Y/ Δ_{-11}
80	375	745	240	135	120	105	95	75	55		36	18	10	5	8	5		135	105		38	46		6	Y/Z _{H-11}
81	375	745	240	135	120	105	95	75	55		36	18	10	5	8	5		135	105		38	46		10	Y/Y _{H-0}
82	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	20	Y/Y _{H-0}
83	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	35	Y/Z _{H-11}
84	400	765	245	155	135	120	105	85	55		40	23	10	8	7	7		155	135	105	40	23	32	10	Y/Y _{H-0}
85	375	745	240	135	120	105	95	75	55		36	18	10	5	8	5		135	105		38	46		6	Y/Y _{H-0}

Продолжение приложения Д

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
86	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	10	Y/Y _{H-0}
87	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	20	Y/Y _{H-0}
88	400	765	245	155	135	120	105	85	55		40	23	10	8	7	7		155	135	105	40	23	32	6	Y/Y _{H-0}
89	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		10	Y/Y _{H-0}
90	420	723	215	195	175	155	120	95	65		78	36	34	22	18	13		195	175	120	78	70	53	20	Y/Z _{H-11}
91	270	535	165	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	75		55	23		6	Y/Z _{H-11}
92	325	624	210	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		115	95		58	25		6	Y/Y _{H-0}
93	325	624	210	115	105	95	75	55	40		34	12	8	9	6	2		115	95		58	25		10	Y/Y _{H-0}
94	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	20	Y/Y _{H-0}
95	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	35	Y/Y _{H-0}
96	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	6	Y/Z _{H-11}
97	430	840	255	175	155	135	105	85	55		42	24	15	13	7	7		175	135	120	42	39	26	20	Y/Z _{H-11}
98	420	723	215	195	175	155	120	95	65		78	36	34	22	18	13		195	175	120	78	70	53	35	Y/Y _{H-0}
99	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	6	47	10	Y/Z _{H-11}
100	490	985	295	195	175	155	135	105	85	55	46	26	15	10	11	6	5	195	175	135	46	6	47	6	Y/Z _{H-11}
101	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		35	Y/Y _{H-0}
102	250	360	155	95	85	75	55	40			31	11	7	7	4			105	85		53	18		6	Y/Y _{H-0}
103	307	520	172	135	120	105	85	65	40		38	17	11	9	6	5		135	120	85	38	17	31	20	Y/Y _{H-0}
104	330	555	175	155	135	120	105	85	55		40	23	10	7	7	7		155	135	105	40	23	31	35	Y/Y _{H-0}
105	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		6	Y/Y _{H-0}
106	400	765	245	155	135	120	105	85	55		40	23	10	8	7	7		155	135	105	40	23	32	10	Y/Z _{H-11}
107	360	625	185	175	155	135	105	85	55		42	25	14	13	5	6		175	135		92	38		20	Y/Y _{H-0}
108	255	434	150	105	95	85	75	55	40		33	11	7	5	6	3		105	85		69	14		10	Y/Z _{H-11}

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

*Примерные проектные задания**Профилактические испытания электрооборудования***Проектное задание №1:**

Какие основные термины и определения используют при проведении профилактических испытаний?

Проектное задание №2:

Какие основные операции проводят при профилактических испытаниях трансформаторов?

Проектное задание №3:

Какие основные операции проводят при профилактических испытаниях электродвигателей?

Проектное задание №4:

Какие основные операции проводят при профилактических испытаниях электропроводки и для чего?

Проектное задание №5:

Какие основные операции проводят при профилактических испытаниях пускорегулирующей аппаратуры?

Проектное задание №6:

Какие метрологическое обеспечение должно быть при проведении профилактических испытаний?

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

*Примерные проектные задания**Диагностика изоляции электрооборудования***Проектное задание №1:**

Общие положения и правила измерения сопротивления изоляции?

Проектное задание №2:

Необходимо пояснить, как учитывается температура при измерении сопротивления изоляции?

Проектное задание №3:

Опишите схемы замещения электрической изоляции электроустановок.

Проектное задание №4:

Опишите способы определения степени увлажнения изоляции и используемые при этом приборы.

Проектное задание №5:

Как проводят испытания изоляции повышенным напряжением переменного тока?

Проектное задание №6:

Как проводят прогнозирование технического состояния электрооборудования по результатам измерения сопротивления изоляции?

Гуляев Павел Владимирович
кандидат технических наук, доцент

Украинцев Максим Михайлович
кандидат технических наук, доцент

Корчагин Павел Тимофеевич
кандидат технических наук, доцент

Татаринцев Андрей Сергеевич

ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ РЕМОНТА

Учебное пособие по выполнению курсовой работы

Издается в авторской редакции

Объем ЭИ: 1,75 Мб

Формат ЭИ: Portable Document Format (PDF)

[На титульную страницу](#)