

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

---

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Часть 1*

### ТРАНСФОРМАТОРЫ

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебно-методического пособия к лабораторным работам  
по курсу «Электрические машины и электропривод»

Омск 2015

УДК 621.314.21(075.8)  
ББК 31.261я73  
Э45

**Электрические машины. Часть 1. Трансформаторы:** Учебно-методическое пособие к лабораторным работам. 2-е изд., с измен. / В. Д. Авилов, Ю. Л. Иванилов, Р. В. Сергеев, Л. Е. Серкова, Е. А. Третьяков, В. В. Харламов, П. К. Шкодун; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. 39 с.

Настоящее издание включает в себя описание пяти лабораторных работ по разделу «Трансформаторы» дисциплины «Электрические машины и электропривод», в котором изложены общие вопросы теории трансформаторов, приведены требования по охране труда и технике безопасности при выполнении лабораторных работ в учебной лаборатории, даны методические рекомендации по исследованию характеристик силовых трансформаторов, обработке экспериментальных данных. Все работы содержат элементы учебных исследований.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения в соответствии с программами специальностей «Подвижной состав железных дорог»: «Локомотивы», «Вагоны», «Электрический транспорт железных дорог», «Технология производства и ремонта подвижного состава», «Высокоскоростной наземный транспорт»; «Системы обеспечения движения поездов»: «Электроснабжение железных дорог», «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», «Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта», «Радиотехнические системы на железнодорожном транспорте».

Библиогр.: 5 назв. Табл. 9. Рис. 12.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. Н. Горюнов;  
канд. техн. наук, доцент В. О. Мельк.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 5  |
| 1. Правила техники безопасности и эксплуатации электроустановок<br>лабораторий .....                                    | 6  |
| 2. Трансформаторы.....  | 7  |
| 3. Лабораторные работы.....   | 8  |
| Лабораторная работа 3.1. Испытание двухобмоточного трансформатора<br>методами холостого хода и короткого замыкания..... | 8  |
| Лабораторная работа 3.2. Испытание двухобмоточного трансформатора<br>методом непосредственной нагрузки.....             | 16 |
| Лабораторная работа 3.3. Определение группы соединения обмоток<br>трехфазных трансформаторов.....                       | 20 |
| Лабораторная работа 3.4. Исследование процесса намагничивания<br>сердечника трансформатора.....                         | 26 |
| Лабораторная работа 3.5. Особенности холостого хода трехфазных<br>трансформаторов.....                                  | 31 |
| Библиографический список.....   | 38 |



## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины и электропривод» состоят из четырех частей. Порядок изложения лабораторных работ соответствует календарному плану изучения дисциплины.

Первая часть посвящена исследованию основных режимов работы и характеристик силовых трансформаторов.

Во второй части представлены указания по исследованию характеристик генераторов и двигателей постоянного тока, описаны способы регулирования выходных параметров.

В третьей и четвертой частях приведены общие вопросы теории соответственно асинхронных и синхронных машин переменного тока, порядок испытания этих машин и снятия их характеристик.

В описании некоторых лабораторных работ отсутствуют теоретические сведения, студент может найти их в рекомендованной литературе и конспекте лекций, наличие которого на практических занятиях обязательно.

Вопросы в подразделах «Расчеты и построения» подробно не комментируются, поэтому студент должен самостоятельно найти пути их решения.

В процессе подготовки к лабораторной работе необходимо заранее внимательно ознакомиться с объектом задания, дополнительной литературой, уяснить порядок выполнения работы. Для контроля своей подготовленности следует ответить на вопросы, приведенные в конце описания каждой лабораторной работы.

В ходе испытаний и обработки экспериментальных данных нужно четко уяснить взаимосвязь между отдельными параметрами, закрепить теоретические знания, научиться применять их на практике. Только в этом случае будет достигнута цель понимания теоретического материала, что необходимо для будущей практической деятельности.

## 1. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ЛАБОРАТОРИЙ

Приступать к выполнению лабораторной работы разрешается только после инструктажа по технике безопасности, который проводит преподаватель.

Эксперименты и испытания следует выполнить на том стенде, который указан преподавателем.

Все переключения в схеме требуется производить при снятом напряжении и полной остановке машин. При наличии в схеме конденсаторов необходимо предварительно разрядить их с помощью перемычки.

Перед включением схемы (после ее проверки преподавателем или дежурным лаборантом) следует убедиться в том, что никто из людей не находится в контакте с элементами схемы.

При включении схемы нужно быть готовым к быстрому ее отключению, если в этом возникнет необходимость.

При обнаружении каких-либо неисправностей в схеме, появлении запаха дыма, чрезмерном нагреве элементов схемы, частей оборудования следует немедленно отключить схему и доложить преподавателю или дежурному лаборанту.

В обращении с электроустановками необходимо проявлять осторожность: никогда не касаться одновременно какого-либо элемента схемы и заземленных частей оборудования (корпуса прибора, электрической машины, фундаментной плиты, батареи, трубы центрального отопления и т. п.).

При поражении человека электрическим током немедленно отключить (снять) напряжение и принять меры к спасению пострадавшего.

Перед сборкой схемы экспериментальной установки необходимо ознакомиться с паспортными данными исследуемой машины и установить ожидаемые предельные значения измеряемых величин – тока, напряжения и мощности. На основании этого подбираются соответствующие измерительные приборы, неправильный выбор которых ведет либо к понижению точности измерений, либо к повреждению приборов. При включении многопредельных измерительных приборов перед первым включением схемы устанавливается наибольший предел измерения, который затем в процессе испытаний уменьшается до необходимого.

Перед включением любой схемы движки регулирующей аппаратуры (автотрансформаторов, потенциометров и реостатов) необходимо установить в положение, которое обеспечивает минимум напряжения и тока в схеме.

Схемы разрешается включать только после проверки преподавателем или дежурным лаборантом правильности монтажа.

При выполнении лабораторной работы особое внимание должно быть уделено положениям, выделенным в тексте, несоблюдение которых ведет к аварии, выходу лабораторного оборудования из строя, а в некоторых случаях – и к травмам как самого работающего, так и его товарищей.

*Соблюдение правил техники безопасности и правил эксплуатации оборудования при работе в лабораториях обязательно.*

## 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно-связанные обмотки и предназначенное для преобразования на основе явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока той же частоты.

Трансформатор является обратимым аппаратом и может служить как для увеличения, так и для уменьшения напряжения. Трансформаторы, предназначенные для увеличения напряжения, называют повышающими, для уменьшения – понижающими.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН), обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, – *обмоткой низшего напряжения* (НН). Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называют *коэффициентом трансформации*.

Основные соотношения в трансформаторах описываются уравнениями равновесия электродвижущих и магнитодвижущих сил, которые устанавливают аналитическую связь между параметрами трансформатора во всем диапазоне нагрузки от режима холостого хода до номинальной.

Еще одним средством, облегчающим исследование электромагнитных процессов и расчет трансформаторов, является применение электрической

схемы замещения приведенного трансформатора. Параметры схемы замещения определяются из опыта холостого хода (х. х.) и короткого замыкания (к. з.).

### 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

#### *Лабораторная работа 3.1*

#### ИСПЫТАНИЕ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА МЕТОДАМИ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**Ц е л ь р а б о т ы:** ознакомиться с косвенным методом испытаний трансформаторов; научиться проводить опыты х. х. и к. з.; закрепить теоретические знания; научиться вести расчет параметров х. х. и к. з. и использовать их для расчета рабочего режима трансформатора [1, с. 362 – 386, 406 – 412, 419 – 430; 2, с. 241 – 245, 274 – 283, 293 – 305; 3, с. 162 – 165, 181 – 188, 199 – 207].

##### **3.1.1. Экспериментальная часть**

- 1) Провести опыт х. х.
- 2) Снять характеристики  $I_0 = f(U_{10})$ ;  $P_0 = f(U_{10})$ ;  $\cos \varphi_0 = f(U_{10})$ .
- 3) Провести опыт к. з.

##### **3.1.2. Расчеты и построения**

- 1) Построить снятые характеристики х. х.
- 2) Вычислить параметры схемы замещения из опытов х. х. и к. з.
- 3) Начертить схему замещения трансформатора с указанием расчетных величин.
- 4) Рассчитать и построить рабочие характеристики трансформатора  $U_2 = f(k_H)$  и  $\eta = f(k_H)$  для двух значений коэффициента мощности ( $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2$  – по заданию преподавателя).



### 3.1.3. Методические рекомендации к проведению исследований

Для выполнения экспериментальной части работы при испытаниях трехфазного трансформатора собрать схему, приведенную на рис. 1, однофазного – на рис. 2.

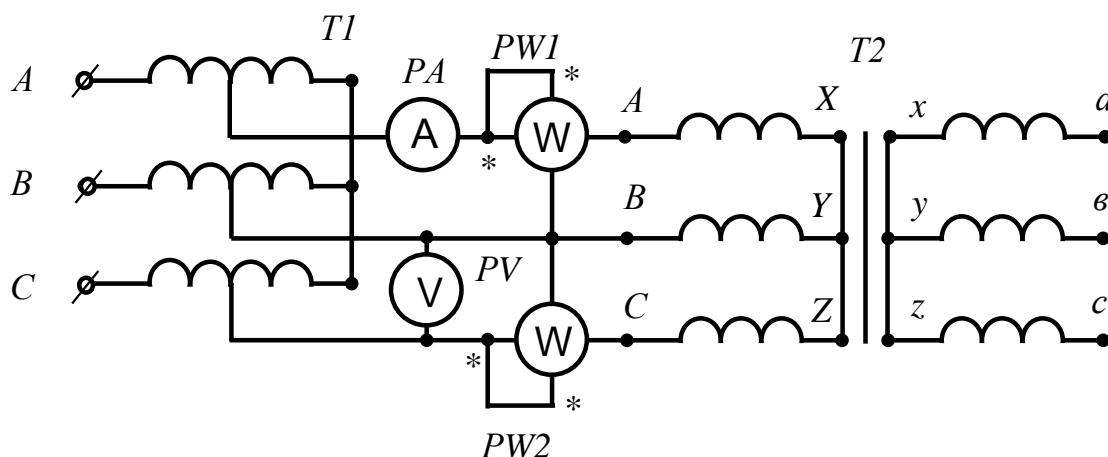


Рис. 1. Электрическая схема для испытаний трехфазного трансформатора

Схема (см. рис. 1) значительно упрощается при наличии комплекта измерительных приборов (КИП), которые включаются между автотрансформатором  $T1$  и испытуемым трансформатором  $T2$ .

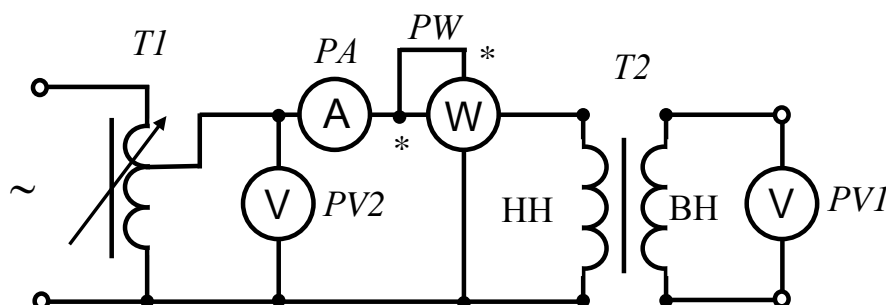


Рис. 2. Электрическая схема для испытаний однофазного трансформатора в режиме холостого хода

*Опыт х. х.* Поскольку ток х. х. трансформатора составляет лишь несколько процентов от номинального, опыт х. х. удобнее проводить, подавая питание на обмотку низкого напряжения (НН). В обмотку высокого

напряжения (ВН) в этом случае включается вольтметр с необходимым пределом измерения. После проверки схемы и ее включения с помощью автотрансформатора повышается напряжение на зажимах испытуемого трансформатора до  $(1,1 - 1,2)U_H$ . Показания приборов записываются в табл. 1, затем напряжение снижается до номинального и затем – до нуля. Всего производится шесть – восемь измерений. Результаты опыта заносятся в табл. 1.

Условимся обмотку ВН считать первичной, НН – вторичной и будем присваивать всем величинам соответственно индексы «1» и «2».

Т а б л и ц а 1

Результаты опыта холостого хода

| Опытное значение   |                    |                  |                    | Расчетное значение |                  |                  |                  |                  |
|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $U_{20}, \text{В}$ | $I_{20}, \text{А}$ | $P_0, \text{Вт}$ | $U_{10}, \text{В}$ | $P_c, \text{Вт}$   | $\cos \varphi_0$ | $z_0, \text{Ом}$ | $r_0, \text{Ом}$ | $x_0, \text{Ом}$ |
|                    |                    |                  |                    |                    |                  |                  |                  |                  |

*Опыт к. з.* проводится при пониженном напряжении и требует особого внимания. Рекомендуется следующий порядок проведения опыта. Источник питания *Т1* подключается к обмотке ВН. *Движок Т1 ставится в нулевое положение.* Зажимы обмотки НН испытуемого трансформатора закорачиваются через амперметр. В цепь обмотки ВН вместо существующего включается вольтметр на 15 – 30 В. Только после этого *очень плавно* повышается напряжение до тех пор, пока в цепи вторичной обмотки не установится номинальный ток, А, который определяется по формулам:

для трехфазного трансформатора –

$$I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{2H}}; \quad (1)$$

однофазного –

$$I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}}, \quad (2)$$

где  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора по паспорту, В·А;

$U_{2H}$  – номинальное напряжение обмотки НН (для трехфазного трансформатора – линейное), В.

Показания приборов записываются в табл. 2. Опыт и расчет параметров к. з. проводят только один раз для  $I_{1K} = I_{1H}$ .

Т а б л и ц а 2

Результаты опыта короткого замыкания

| Опытное значение |               |               |                  | Расчетное значение |               |               |                  |            |            |                 |                 |                 |                 |
|------------------|---------------|---------------|------------------|--------------------|---------------|---------------|------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $U_{1K}$<br>В    | $I_{1K}$<br>А | $I_{2K}$<br>А | $P_{к.з.}$<br>Вт | $z_{K}$<br>Ом      | $r_{K}$<br>Ом | $x_{K}$<br>Ом | $\cos \varphi_K$ | $U_K$<br>В | $u_K$<br>% | $U_{K.а.}$<br>В | $u_{K.а.}$<br>% | $U_{K.p.}$<br>В | $u_{K.p.}$<br>% |
|                  |               |               |                  |                    |               |               |                  |            |            |                 |                 |                 |                 |

### 3.1.4. Основные расчетные соотношения

При испытаниях трехфазного трансформатора все последующие расчеты ведутся по фазным току и напряжению. Для этого необходимо опытные данные в зависимости от схемы соединения обмоток перевести в значения фазных величин и записать их в табл. 1 и 2. Во всех приведенных ниже формулах индекс, указывающий на фазную величину, отсутствует.

Особо следует отметить, что вольтметр КИП включен по схеме с искусственной нулевой точкой, т. е. в любом случае показывает фазное напряжение в подключенной сети. Таким образом, при соединении обмотки трансформатора по схеме  $\Delta$  (треугольник) показания вольтметра следует увеличить в  $\sqrt{3}$  раз. Амперметр КИП в любом случае показывает значение линейного тока, т. е. при соединении обмотки трансформатора по схеме  $\Delta$  фазный ток обмотки будет в  $\sqrt{3}$  раз меньше.

При испытаниях однофазного трансформатора подобных проблем не возникает.

Коэффициент трансформации испытуемого трансформатора может быть найден из опыта х. х.:

$$k = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}, \quad (3)$$

где  $U_{10}$  и  $U_{20}$  – соответствующие фазные напряжения.

Если в опыте х. х. питание было подведено к обмотке НН, то сопротивления намагничивающей цепи схемы замещения необходимо «привести» к обмотке ВН, Ом:

$$r_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2} = \frac{P_0}{I_{20}^2} k^2; \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \frac{U_{20}}{I_{20}} k^2; \quad (5)$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (6)$$

Коэффициент мощности при х. х.

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{20} I_{20}}. \quad (7)$$

Для трехфазных трансформаторов значение потерь х. х.  $P_0$ , измеренное в опыте х. х., следует уменьшить в три раза (потери на одну фазу).

Расчет сопротивлений х. х. проводится только один раз для номинального значения напряжения. Коэффициент мощности рассчитывается для всех измеренных значений.

При опыте к. з. прежде всего определяется один из важнейших параметров трансформатора – напряжение к. з., %:

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1H}} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где  $U_k$  – напряжение, измеренное в опыте к. з., В;

$U_{1H}$  – номинальное напряжение первичной обмотки, указано в паспорте трансформатора, В.

Сопротивления к. з., Ом:

$$r_k = \frac{P_{к.н}}{I_{1н}^2}; \quad (9)$$

$$z_k = \frac{U_k}{I_{1н}}; \quad (10)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (11)$$

где  $I_{1н}$  – номинальный ток первичной обмотки трансформатора, определяется по формуле (1) или (2) с заменой  $U_{2н}$  на  $U_{1н}$ , А.

Для трехфазных трансформаторов по уравнению (1) рассчитывается линейный ток, при соединении обмотки трансформатора в  $\Delta$  значение линейного тока следует уменьшить в  $\sqrt{3}$  раз.

Коэффициент мощности при к. з.

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{к.н}}{U_{1к} I_{1н}}. \quad (12)$$

Для трехфазных трансформаторов в формулах (9) – (12) берутся потери к. з. на одну фазу, как и в опыте х. х.

Сопротивления обмоток приведенного трансформатора с достаточной степенью точности определяются по формулам:

$$r_1 = r'_2 = \frac{r_k}{2}; \quad (13)$$

$$x_1 = x'_2 = \frac{x_k}{2}. \quad (14)$$

Составляющие напряжения к. з., %:

$$u_k = \frac{I_{1н} z_k}{U_{1н}} \cdot 100 \%; \quad (15)$$

$$u_{к.р} = \frac{I_{1н} x_{к}}{U_{1н}} \cdot 100 \% ; \quad (16)$$

$$u_{к.а} = \frac{I_{1н} r_{к}}{U_{1н}} \cdot 100 \% . \quad (17)$$

Числитель выражений (15) – (17) соответствует значениям составляющих напряжения короткого замыкания в вольтах, что требуется для заполнения расчетной части табл. 2.

Для анализа работы трансформатора под нагрузкой и построения рабочих характеристик требуется все необходимые данные записать в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Расчет рабочих характеристик трансформатора

| Параметр трансформатора                                   |                      | Значение параметра при $k_H$ |      |     |      |     |     |
|---|----------------------|------------------------------|------|-----|------|-----|-----|
|   |                      | 0                            | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,0 | 1,5 |
| $I_2, A$  |                      |                              |      |     |      |     |     |
| $P_2 = k_H S_H \cos \varphi_2, Bт$                        | $\cos \varphi_2 = 1$ |                              |      |     |      |     |     |
|   | $\cos \varphi_2 =$   |                              |      |     |      |     |     |
| $P_M = k_H^2 P_{к.н}, Bт$                                 |                      |                              |      |     |      |     |     |
| $P_c, Bт$   |                      |                              |      |     |      |     |     |
| $\sum P = P_c + P_M, Bт$                                  |                      |                              |      |     |      |     |     |
| $\eta, \%$  | $\cos \varphi_2 = 1$ |                              |      |     |      |     |     |
|   | $\cos \varphi_2 =$   |                              |      |     |      |     |     |
| $\Delta u, \%$  | $\cos \varphi_2 = 1$ |                              |      |     |      |     |     |
|   | $\cos \varphi_2 =$   |                              |      |     |      |     |     |
| $U_2 = U_{20} \left( 1 - \frac{\Delta u}{100} \right), B$ | $\cos \varphi_2 = 1$ |                              |      |     |      |     |     |
|   | $\cos \varphi_2 =$   |                              |      |     |      |     |     |

Изменение вторичного напряжения при работе трансформатора под нагрузкой, %,

$$\Delta u = k_H (u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_2), \quad (18)$$

где  $k_H = \frac{I_2}{I_{2н}} = \frac{P_2}{P_{2н}}$  – коэффициент нагрузки.

Расчет по формуле (18) следует произвести для двух значений коэффициента мощности ( $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2$  – по заданию преподавателя).

Внешняя характеристика трансформатора описывается уравнением, В:

$$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right). \quad (19)$$

В рассматриваемом случае

$$U_{20} = U_{2H} \left(1 + \frac{\Delta u_H}{100}\right), \quad (20)$$

где  $\Delta u_H$  – изменение напряжения, рассчитанное по формуле (18) при  $k_H = 1$ .

КПД трансформатора определяется по выражению, %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}\right) \cdot 100, \quad (21)$$

где  $\sum P$  – суммарные потери, Вт,

$$\sum P = P_c + P_m; \quad (22)$$

$P_c$  – потери в стали, Вт,

$$P_c = P_0 - I_{10}^2 r_1 = P_0 - \left(\frac{I_{20}}{k}\right)^2 r_1, \quad (23)$$

где  $I_{20}$  – ток х. х. при номинальном напряжении, значение принять из табл. 1, А;

$P_m = k_H^2 P_{K.H}$  – потери в обмотках (в меди), Вт;

$P_2 = k_H S_H \cos \varphi_2$  – мощность, отдаваемая трансформатором, Вт.

КПД трансформатора достигает максимума при равенстве потерь в стали (постоянных) потерям в меди (переменным). Коэффициент нагрузки при максимальном КПД

$$k_{H.M} = \sqrt{\frac{P_c}{P_{K.H}}}. \quad (24)$$

Значение максимального КПД рассчитывают по формуле (21), подставив соответствующее значение  $k_{н.м.}$

В отчете по работе необходимо дать письменные ответы на контрольные вопросы 6, 8, 9, 11 – 13 с указанием в случае необходимости конкретных величин.

### 3.1.5. Контрольные вопросы

- 1) В чем состоит принцип действия трансформатора?
- 2) Как определить коэффициент трансформации?
- 3) Что такое приведенный трансформатор?
- 4) Как проводится опыт х. х.?
- 5) Как рассчитать параметры схемы замещения трансформатора?
- 6) Начертить схемы замещения для режимов х. х., к. з., нагрузки. В чем их различие?
- 7) Какие потери существуют в трансформаторе? В чем состоит их физическая сущность и каков способ их определения на реальном трансформаторе?
- 8) Как изменяются потери в стали, меди при изменении нагрузки?
- 9) Что называется напряжением к. з. ?
- 10) Как изменяется вторичное напряжение с изменением нагрузки при постоянном коэффициенте мощности?
- 11) Как изменяются потери х. х. с изменением напряжения питающей сети?
- 12) Как изменяются КПД трансформатора и внешняя характеристика при изменении характера нагрузки ( $\cos \varphi_2$ )?
- 13) В каком случае КПД трансформатора достигает максимума?

### *Лабораторная работа 3.2*

#### ИСПЫТАНИЕ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА МЕТОДОМ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ НАГРУЗКИ

**Ц е л ь р а б о т ы:** ознакомиться с прямым методом испытаний трансформаторов; закрепить теоретические знания; приобрести опыт обработки



экспериментальных данных; получить практическое подтверждение положений теории трансформаторов [1, с. 419 – 430; 2, с. 298 – 311; 3, с. 211 – 217].

### 3.2.1. Экспериментальная часть

Снять внешние характеристики и кривые КПД трансформатора при различном характере нагрузки:  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2$  – по заданию преподавателя.

### 3.2.2. Расчеты и построения

1) Построить внешние характеристики  $U_2 = f(k_H)$  трансформатора (на одном графике), объяснить их различие.

2) Построить кривые КПД  $\eta = f(k_H)$  при заданных значениях нагрузки, объяснить их различие.

3) Построить кривые изменения коэффициента мощности первичной обмотки в зависимости от нагрузки  $\cos \varphi_1 = f(k_H)$ .

4) Сопоставить полученные зависимости с расчетными из лабораторной работы 1.

### 3.2.3. Методические рекомендации к проведению исследований

Для выполнения экспериментальной части работы необходимо для трехфазного трансформатора собрать схему, приведенную на рис. 3, для однофазного – на рис. 4. Испытания рекомендуется проводить на том же трансформаторе, что и в работе 1 (это позволит сравнить расчетные и экспериментальные характеристики).

В качестве реактивной нагрузки можно использовать обратное включение автотрансформатора  $T2$  – нагрузкой является вторичная обмотка автотрансформатора при разомкнутых зажимах первичной обмотки. В этом случае ток, потребляемый автотрансформатором, будет почти чисто намагничивающим, т. е. будет носить индуктивный характер.

Испытания проводятся при симметричной нагрузке, поэтому для замера мощности можно использовать по одному фазному ваттметру с каждой стороны трансформатора, при этом следует помнить, о том что их параллельные обмотки должны быть включены на фазное напряжение. При соединении

одной из обмоток трансформатора по схеме  $\Delta$  однофазный ваттметр может быть включен «в рассечку» одной из фаз трансформатора.

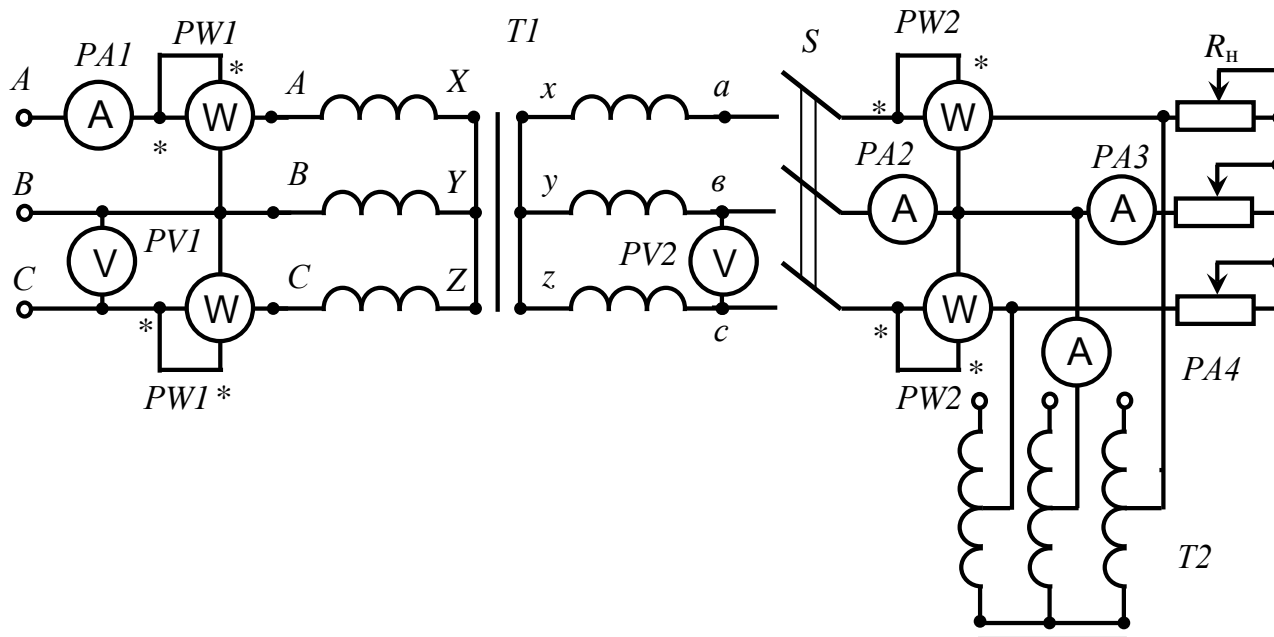


Рис. 3. Электрическая схема для испытаний трехфазного трансформатора под нагрузкой

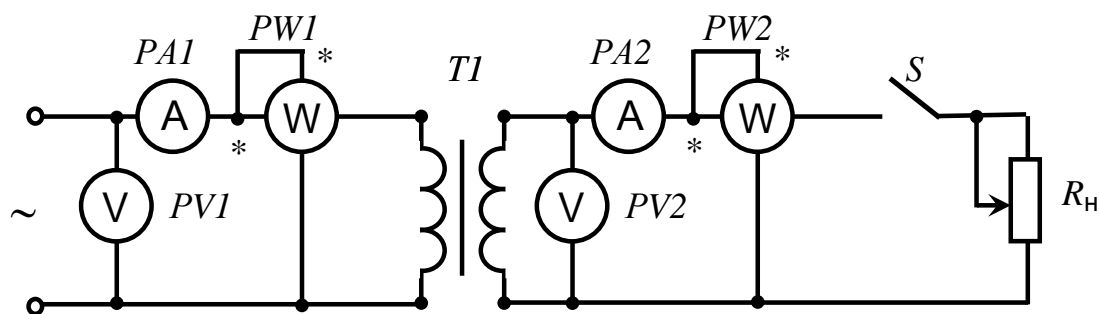


Рис. 4. Электрическая схема для испытаний однофазного трансформатора под нагрузкой

Испытания при любом характере нагрузки начинают с режима холостого хода при разомкнутом рубильнике  $S$ . Затем рубильник включается и постепенно увеличивается нагрузка приблизительно до 1,25 номинальной. Всего необходимо произвести измерения в шести – восьми точках, результаты записать в табл. 4.

Испытания при чисто активной нагрузке ( $\cos \varphi_2 = 1$ ) проводятся при отключенном автотрансформаторе  $T2$ .

Для испытаний при коэффициенте мощности, отличающемся от единицы, следует подключить автотрансформатор и поставить его движок в крайнее верхнее положение (рукоятка автотрансформатора повернута по часовой стрелке до упора). Значения параметров, характеризующих первую точку внешней характеристики, снимаются при разомкнутом рубильнике  $S$ . Затем включаются рубильник и первая ступень нагрузочного сопротивления  $R_H$ . По установившемуся току активной нагрузки  $I_{2a}$  (амперметр  $PA3$ ) рассчитывается необходимый реактивный ток:

$$I_{2p} = I_{2a} \operatorname{tg}(\arccos \varphi_2), \quad (25)$$

который и устанавливается с помощью  $T2$ . Контроль значений реактивного тока ведется по амперметру  $PA4$ . Показания приборов записываются в табл. 4. Затем включается вторая ступень нагрузочного сопротивления и все операции повторяются.

Т а б л и ц а 4

Экспериментальные и расчетные данные испытания трансформатора под нагрузкой при  $\cos \varphi_2 =$

| Параметр         | Значение параметра при $k_H$ |      |     |      |     |      |
|------------------|------------------------------|------|-----|------|-----|------|
|                  | 0                            | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,0 | 1,25 |
| $U_1$ , В        |                              |      |     |      |     |      |
| $I_1$ , А        |                              |      |     |      |     |      |
| $P_1$ , Вт       |                              |      |     |      |     |      |
| $\cos \varphi_1$ |                              |      |     |      |     |      |
| $U_2$ , В        |                              |      |     |      |     |      |
| $I_2$ , А        |                              |      |     |      |     |      |
| $I_{2a}$ , А     |                              |      |     |      |     |      |
| $I_{2p}$ , А     |                              |      |     |      |     |      |
| $P_2$ , Вт       |                              |      |     |      |     |      |
| $\eta$ , %       |                              |      |     |      |     |      |

Коэффициент нагрузки рассчитывается по выражению:

$$K_H = \frac{S_2}{S_H} = \frac{P_2}{P_{2H}} = \frac{I_2}{I_{2H}}. \quad (26)$$

При использовании однофазного ваттметра  $P_2 = 3P_{2ф}$ .

Поскольку КПД трансформатора достаточно высок, опыт непосредственной нагрузки требует тщательного подбора измерительных приборов и точной записи их показаний, чтобы избежать грубых ошибок в результатах.

В отчете по работе необходимо дать письменные ответы на контрольные вопросы 5 – 10.

### **3.2.4. Контрольные вопросы**

- 1) Что называется внешней характеристикой трансформатора?
- 2) Как рассчитать необходимое значение реактивного тока?
- 3) Как при проведении опыта изменить значение реактивного тока?
- 4) Что означает коэффициент нагрузки?
- 5) Как изменяется вторичное напряжение при увеличении нагрузки трансформатора?
- 6) Как изменяется КПД трансформатора при изменении нагрузки?
- 7) Как характер нагрузки влияет на изменение вторичного напряжения трансформатора?
- 8) Как характер нагрузки влияет на КПД трансформатора при одном и том же значении коэффициента нагрузки?
- 9) Как изменяется коэффициент мощности на первичной стороне трансформатора при увеличении нагрузки?
- 10) Как изменяется коэффициент мощности на первичной стороне трансформатора при изменении характера нагрузки?

### *Лабораторная работа 3.3*

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Ц е л ь р а б о т ы:** ознакомиться со схемами и группами соединения обмоток трехфазного трансформатора, научиться изменять и определять группы соединения обмоток в практических условиях [1, с. 369 – 400; 2, с. 254 – 258; 3, с. 188 – 195].

### 3.3.1. Основные положения теории

Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены звездой или треугольником, или «зигзагом». На схемах эти соединения принято обозначать следующими знаками: звезда –  $Y$ ; треугольник –  $\Delta$ ; «зигзаг» –  $Z$ . Если обмотки трансформаторов, соединенные по схеме  $Y$  или  $Z$ , имеют выведенную нулевую точку, то в обозначениях добавляют индекс «0», например  $Y_0$ ,  $Z_0$ .

В общем обозначении схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов первым всегда указывается соединение обмотки высшего напряжения.

Начало фазы обмотки высшего напряжения принято обозначать прописными начальными буквами латинского алфавита ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ), а конец – последними ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Для обмотки низшего напряжения берутся соответственно строчные буквы –  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Взаимное расположение векторов первичного и вторичного линейного напряжения определяет группу соединения обмоток трансформатора.

Векторы первичного и вторичного линейного напряжения могут быть сдвинуты относительно друг друга на угол, кратный  $30^\circ$ . Показатель кратности вводится в обозначение группы соединения обмоток. Например, на рис. 5, *а* показана 11-я группа соединения, рис. 5, *б* – 6-я; рис. 5, *в* – 4-я и рис. 5, *г* – 0-я (ранее она называлась 12-й).

Таким образом, группа соединения обмоток трансформатора показывает взаимное расположение векторов первичного и вторичного линейного напряжения.

Группу соединения обмоток трансформатора можно определить и другим способом. Если вектор первичного линейного напряжения представить минутной стрелкой на циферблате часов и совместить его с цифрой 12, то вектор вторичного линейного напряжения (считая его часовой стрелкой) покажет группу соединения обмоток данного трансформатора. Исключение представляет 0-я группа, представленная на рис. 5, *г*.

Группа соединения обмоток трансформаторов зависит от направления намотки обмоток, маркировки выводов и схемы соединения. При одинаковом направлении намотки и одинаковой маркировке начала и конца обмотки одного стержня трансформатора векторы их фазного напряжения будут совпадать по

направлению. При изменении намотки обмотки или маркировки выводов у одной из обмоток векторы фазного напряжения окажутся сдвинутыми на  $180^\circ$ . Таким образом, для изменения группы соединения на противоположную достаточно изменить маркировку выводов обмотки – поменять начало и конец одной из обмоток. Меняя маркировку выводов и схему соединения фаз обмотки, можно получить любую группу соединения (от 0-й до 11-й). Схема соединения  $Y/Y$  дает только четные группы, тогда как схема  $Y/\Delta$  или  $\Delta/Y$  – только нечетные.

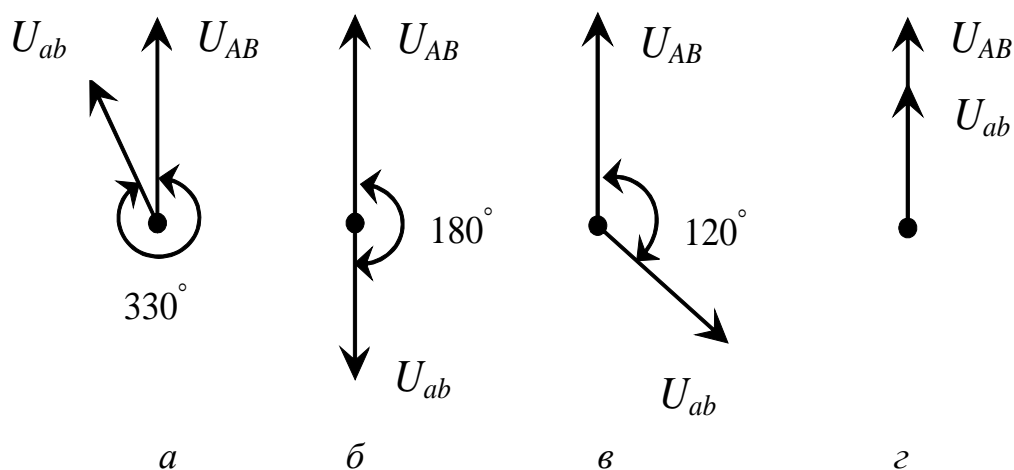


Рис. 5. Векторные диаграммы групп соединения обмоток трансформатора

По ГОСТ 11677-85 основными группами соединения силовых трансформаторов общепромышленного назначения приняты 0-я, 5-я, 6-я и 11-я.

На электрифицированных железных дорогах, работающих на переменном токе, с целью симметрирования нагрузки на питающих ЛЭП допускается применение других групп соединения обмоток тяговых трансформаторов.

### 3.3.2. Экспериментальная часть

- 1) Включить трансформатор по схеме  $Y/Y$  и определить группу соединения обмоток; изменить группу на противоположную.
- 2) Выполнить задание п. 1 для схемы  $Y/\Delta$ .
- 3) Включить трансформатор по схеме, предложенной преподавателем, и определить группу соединения обмоток.

### 3.3.3. Расчеты и построения

- 1) Определить группы соединения обмоток расчетным путем.
- 2) Построить векторные диаграммы для 0-й, 5-й, 6-й и 11-й групп соединения обмоток.
- 3) Построить векторную диаграмму и определить группу соединения обмоток для схемы, заданной преподавателем.

### 3.3.4. Методические рекомендации к проведению исследований

Группу соединения обмоток трансформаторов можно определить с помощью вольтметра и последующего построения совместной векторной диаграммы. С этой целью соединяются перемычкой два одноименных зажима первичной и вторичной обмоток, например  $A$  и  $a$ , и замеряется напряжение на оставшихся выводах:  $U_{AB}$ ,  $U_{ab}$ ,  $U_{Bb}$ ,  $U_{Cb}$ ,  $U_{Bc}$  и  $U_{Cc}$ . Результаты эксперимента записываются в табл. 5, последний столбец которой заполняется после построения векторной диаграммы. Измерение напряжения производится путем прикосновения проводов, соединенных с вольтметром, к соответствующим зажимам трансформатора. *Будьте внимательны и осторожны!*

Величина  $k_{\text{л}}$  в табл. 5 и последующих расчетах представляет собой коэффициент трансформации линейных напряжений  $k_{\text{л}} = U_{AB}/U_{ab}$ .

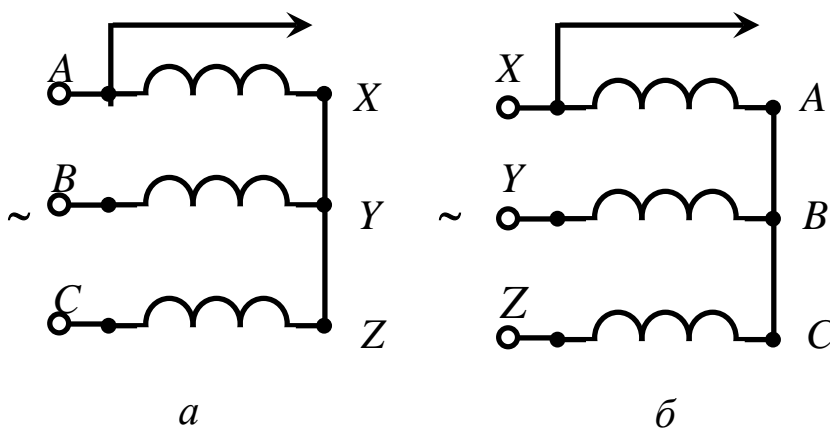


Рис. 6. Маркировка выводов  
первичной обмотки до изменения (а)  
и после изменения (б)

Для изменения группы соединения обмоток трансформаторов на противоположную необходимо изменить маркировку выводов первичной обмотки (рис. 6). Схема соединения вторичной обмотки при этом остается без изменения.

Экспериментальные данные исследования групп  
соединения обмоток трансформатора

| Схема<br>соединения | Напряжение, В |          |          |          |          |          | Коэффици-<br>циент $k_L$ | Группа<br>соедине-<br>ния |
|---------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------------|---------------------------|
|                     | $U_{AB}$      | $U_{ab}$ | $U_{Bb}$ | $U_{Bc}$ | $U_{Cb}$ | $U_{Cc}$ |                          |                           |
| Y/Y                 |               |          |          |          |          |          |                          |                           |
| Y/ $\Delta$         |               |          |          |          |          |          |                          |                           |
| ...                 |               |          |          |          |          |          |                          |                           |

Для проверки групп соединения обмоток трансформатора аналитическим путем необходимо рассчитать значения напряжений  $U_{Bb}$ ,  $U_{Cb}$ ,  $U_{Bc}$  и  $U_{Cc}$  по выражениям, приведенным в табл. 6 (напряжение  $U_2 = U_{ab}$ ), и заполнить ее расчетную часть. Затем в табл. 5 выбрать соответствующую строку, имеющую те же (или близкие) значения напряжения, полученные опытным путем.

Для построения совмещенной векторной диаграммы вначале строится в масштабе треугольник первичных линейных напряжений (рис. 7). Поскольку первичная система напряжений симметрична, этот треугольник будет равносторонним со стороной, равной напряжению  $U_{AB}$  (рис. 7, а).

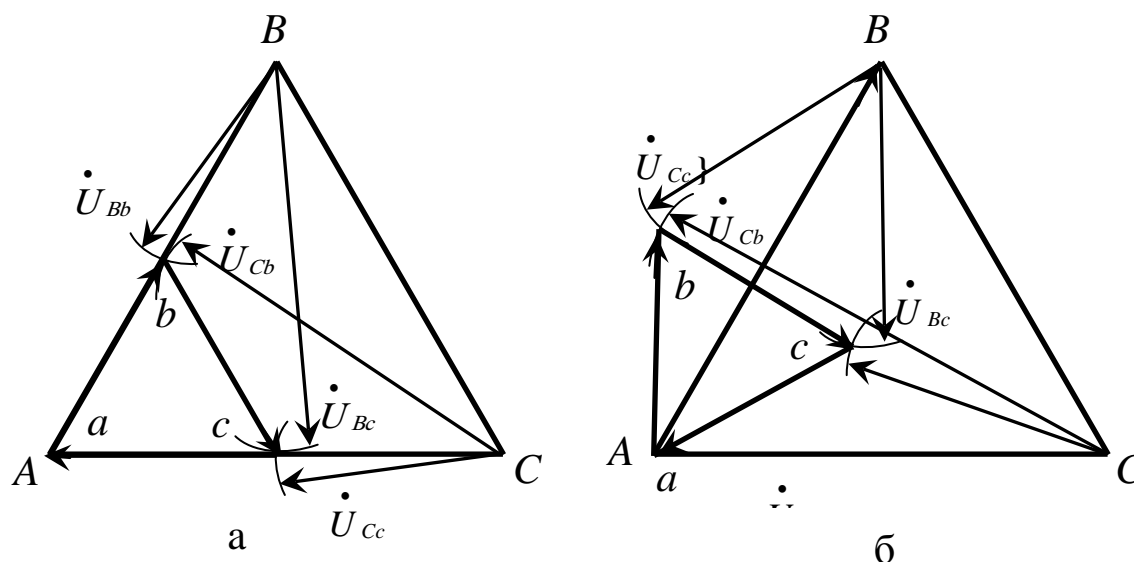


Рис. 7. Схематичное представление порядка построения  
треугольника вторичных напряжений

Треугольник вторичных линейных напряжений строится методом засечек (рис. 7, б). Потенциалы соединенных перемычкой зажимов равны, поэтому точки A и a на диаграмме оказываются совмещенными. Из вершин



треугольника  $B$  и  $C$  делаются засечки радиусом  $U_{Bb}$  и  $U_{Cb}$  соответственно, точка их пересечения дает вершину треугольника  $b$ , радиусом  $U_{Bc}$  и  $U_{Cc}$  — соответственно  $c$ . Соединив точки  $a$ ,  $b$  и  $c$ , получим треугольник вторичных линейных напряжений. Угол между напряжениями  $U_{AB}$  и  $U_{ab}$  покажет группу соединения.

Т а б л и ц а 6

Расчетные соотношения для проверки группы соединения обмоток трансформатора

| Группа соединения      | Значение напряжения, В                  |      |   |      |                                 |      |
|------------------------|---|------|---|------|---------------------------------|------|
|                        | $U_{Bb} = U_{Cc}$                       |      | $U_{Bc}$                                |      | $U_{Cb}$                        |      |
| Y/Y <sub>0</sub> – 0-я | $U_2(k_{л} - 1)$                        |      | $U_2\sqrt{1 - k_{л} + k_{л}^2}$         |      | $U_2\sqrt{1 - k_{л} + k_{л}^2}$ |      |
|                        | расчет                                  | опыт | расчет                                  | опыт | расчет                          | опыт |
|                        |   |      |   |      |                                 |      |
| Y/Y – 6-я              | $U_2(k_{л} + 1)$                        |      | $U_2\sqrt{1 + k_{л} + k_{л}^2}$         |      | $U_2\sqrt{1 + k_{л} + k_{л}^2}$ |      |
|                        | расчет                                  | опыт | расчет                                  | опыт | расчет                          | опыт |
|                        |   |      |   |      |                                 |      |
| Y/Δ – 11-я             | $U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$ |      | $U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$ |      | $U_2\sqrt{1 + k_{л}^2}$         |      |
|                        | расчет                                  | опыт | расчет                                  | опыт | расчет                          | опыт |
|                        |   |      |   |      |                                 |      |
| Y/Δ – 5-я              | $U_2\sqrt{1 + \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$ |      | $U_2\sqrt{1 + \sqrt{3}k_{л} + k_{л}^2}$ |      | $U_2\sqrt{1 + k_{л}^2}$         |      |
|                        | расчет                                  | опыт | расчет                                  | опыт | расчет                          | опыт |
|                        |   |      |   |      |                                 |      |

Группа соединения обмоток трансформаторов для схемы, заданной преподавателем, определяется только по векторной диаграмме.

В отчете необходимо дать письменные ответы на контрольные вопросы 2 – 4, 6, 7, 12, 13.

### 3.3.4. Контрольные вопросы

1) Какие схемы применяются для соединения обмоток силовых трехфазных трансформаторов?

2) Как различаются линейные и фазовые напряжения и токи при различных схемах соединения обмоток трансформатора?

- 3) Как маркируются начало и конец обмоток фаз трансформатора?
- 4) Что показывает группа соединения обмоток трансформатора?
- 5) Как определить номер группы соединения обмоток трансформатора по циферблату часов?
- 6) От каких факторов зависит группа соединения обмоток трансформатора?
- 7) Как можно изменить группу соединения обмоток трансформатора?
- 8) Как изменить группу соединения обмоток трансформатора на противоположную?
- 9) Какие группы соединения обмоток трансформатора можно получить при схеме соединения Y/Y?
- 10) Какие группы соединения обмоток трансформатора можно получить при схеме соединения Y/ $\Delta$ ?
- 11) Какие группы соединения обмоток трансформатора можно получить при схеме соединения  $\Delta$ /Y?
- 12) Как практически определить группу соединения обмоток трансформатора?
- 13) С какой целью необходимо знать группу соединения обмоток трансформатора?

### *Лабораторная работа 3.4*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАМАГНИЧИВАНИЯ СЕРДЕЧНИКА ТРАНСФОРМАТОРА

**Ц е л ь р а б о т ы:** ознакомиться с процессом намагничивания магнитной системы трансформатора; изучить влияние насыщения сердечника на форму кривой тока холостого хода; закрепить теоретические знания [1, с. 372 – 380; 2, с. 262 – 264; 3, с. 184 – 185].

### **3.4.1. Основные положения теории**

При включении трансформатора на синусоидальное напряжение основной магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике трансформатора будет также синусоидальным и отстающим от приложенного напряжения на угол  $\pi/2$ . В свою очередь создаваемые этим потоком ЭДС в обмотках трансформатора

сохраняют синусоидальную форму и будут отставать от магнитного потока также на угол  $\pi/2$ .

Если пренебречь падением напряжения в первичной обмотке, которое в режиме х. х. очень мало, то соотношение между приложенным напряжением и магнитным потоком будет определяться выражением:

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m = 4,44 f_1 w_1 B_c \Pi_c \cdot 10^{-4}, \quad (27)$$

где  $f_1$  – частота питающей сети, Гц;

$w_1$  – число витков первичной обмотки;

$\Pi_c$  – сечение стержня трансформатора (сердечника), см<sup>2</sup>;

$B_c$  – индукция в стержне (амплитудное значение), Тл.

Поскольку кривая намагничивания сердечника имеет нелинейный характер, кривая намагничивающего тока будет отличаться от синусоиды, и тем больше, чем сильнее насыщен сердечник.

Построение кривой тока х. х. при синусоидальном магнитном потоке  $\Phi$  и различной степени насыщения сердечника показано на рис. 8.

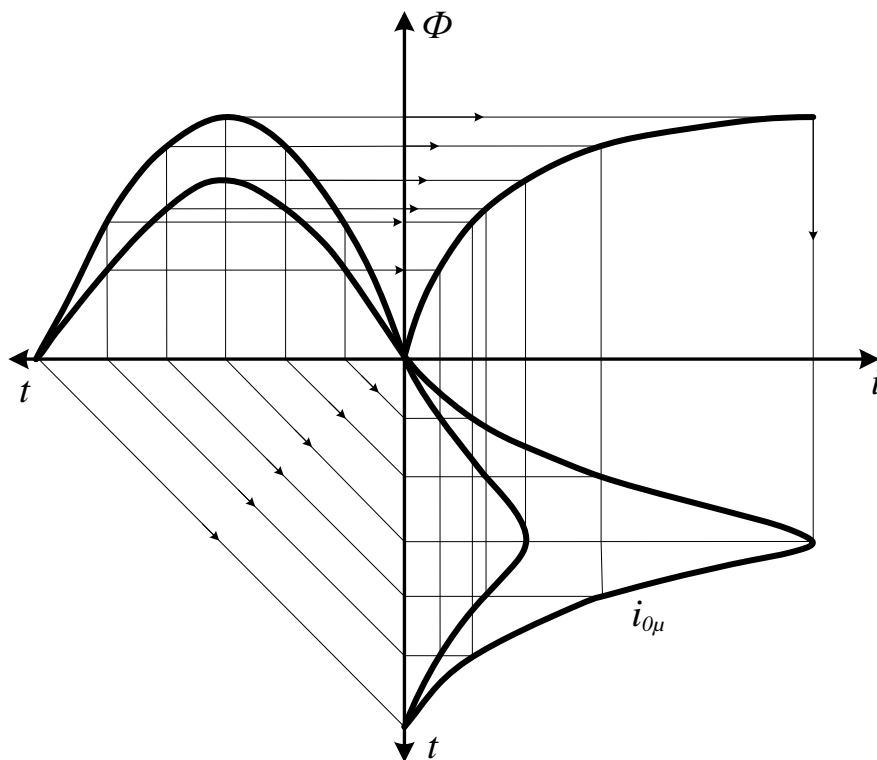


Рис. 8. Схематичное представление порядка построения кривой тока х. х.

Из числа высших гармонических составляющих тока более всего выражена третья гармоника и несколько меньше – пятая. Гармоники более высокого порядка относительно малы, и ими в данном случае можно пренебречь. Наличие высших гармоник придает кривой намагничивающего тока резко заостренную форму.

### 3.4.2. Экспериментальная часть

- 1) Собрать схему экспериментальной установки (рис. 9).
- 2) Проследить изменение формы кривой тока  $x. x.$  при различном насыщении сердечника трансформатора.
- 3) Зарисовать кривую тока  $x. x.$  при следующих значениях напряжения  $U_1$ :  $0,5U_H$ ;  $U_H$ ;  $1,25U_H$ ;  $1,5U_H$ .

### 3.4.3. Расчеты и построения

- 1) Привести осциллограммы тока  $x. x.$  для различных режимов.
- 2) Рассчитать индукцию в сердечнике трансформатора при различном насыщении и построить кривую намагничивания сердечника  $B_c = f(I_{0\mu})$ .
- 3) Пользуясь кривой намагничивания, построить теоретические кривые тока  $x. x.$ , сравнить их с полученными экспериментально.

### 3.4.4. Методические рекомендации к проведению исследований

Для проведения экспериментальной части работы необходимо собрать схему, приведенную на рис. 9. В качестве испытуемого трансформатора рекомендуется взять среднюю фазу трехстержневого трансформатора (можно использовать однофазный трансформатор, методика проведения работы при этом не изменится). Питание через обмотку подается на обмотку НН с таким расчетом, чтобы можно было повысить напряжение на ней до  $1,5U_H$ .

Кривую тока можно снять, используя в качестве шунта обмотку амперметра. *Внимание! Обмотку амперметра КИП использовать нельзя!* В этом случае в качестве шунта используется несколько витков ползункового

реостата  $r$  (если его обмотка рассчитана на ток не меньше того, который будет применяться в процессе опыта).

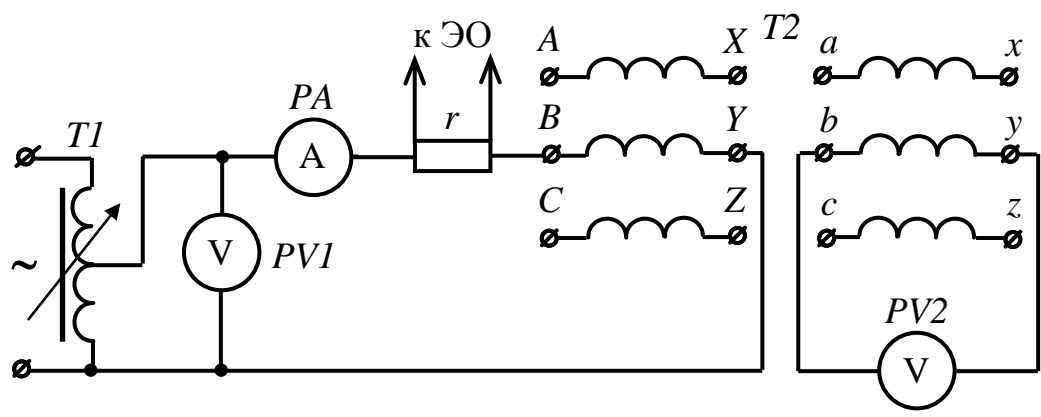


Рис. 9. Электрическая схема для проведения опыта

Рекомендуется опыт начинать с напряжения питания, равного  $1,5U_H$ . При этом настраивается осциллограф и в процессе всего опыта настройка его не меняется.

При  $U = 1,5U_H$  с экрана осциллографа необходимо перерисовать на кальку или прозрачную бумагу кривую тока х. х. и записать показания приборов в табл. 7. Затем напряжение питания снижается, показания приборов также заносятся в табл. 7, срисовываются кривые тока.

Т а б л и ц а 7

Экспериментальные и расчетные данные исследования  
процесса намагничивания трансформатора

| Параметр трансформатора    | Значение параметра трансформатора при $U_1$ |          |          |          |          |          |
|----------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|
|                            | $0,2U_H$                                    | $0,5U_H$ | $0,7U_H$ | $1,0U_H$ | $1,2U_H$ | $1,5U_H$ |
| $U_2$ , В                  |   |          |          |          |          |          |
| $I_0$ , А                  |   |          |          |          |          |          |
| $I_{0m} = \sqrt{2}I_0$ , А |   |          |          |          |          |          |
| $B_{cm}$ , Тл              |   |          |          |          |          |          |

Расчет индукции в сердечнике трансформатора проводится на основании формулы (16), число витков обмотки и сечение стержня приведены в паспорте. В случае отсутствия паспортных данных при номинальном напряжении можно принять значение  $B_{с.н}$  равным (1,58 – 1,68) Тл и далее изменять его пропорционально напряжению.

При расчете  $B_c$  и построении кривой намагничивания пренебрегаем падением напряжения в первичной обмотке и потерями в стали трансформатора, т. е. считаем  $U_1 = E_1$  и  $I_{0\mu m} = I_{0m} = \sqrt{2}I_0$ .

Построение кривой тока х. х. показано на рис. 8. Вначале следует нарисовать кривую намагничивания. Затем на этой кривой отмечается точка, соответствующая значению напряжения питания, равному значению номинального (по соответствующему току  $I_{0m}$ ). Ордината данной точки  $B_{cm}$  переносится в левую часть чертежа, где нужно построить синусоиду с амплитудой, равной  $B_{cm}$ . Далее, используя полученные синусоиду и кривую намагничивания, легко провести кривую тока х. х. (на рис. 8 процесс построения показан стрелками).

Аналогично производится построение кривых тока х. х. для  $U_1 = 0,5U_H$  и  $1,5U_H$ .

Для сравнения построенной кривой  $I_{0\mu}$  с полученной экспериментально (срисованной с экрана осциллографа) последнюю следует перестроить в том же масштабе по осям тока и времени путем обычного пересчета.

Все построения (для заданных значений напряжения) должны быть выполнены на одном чертеже с использованием различных цветов и видов линий. Для удобства сравнения теоретической и экспериментальной кривых следует построить их на отдельном чертеже (только для  $U_1 = U_H$ ).

В отчете необходимо дать письменные ответы на все контрольные вопросы и сделать выводы по результатам работы.

### 3.4.5. Контрольные вопросы

- 1) Какую форму кривой имеет магнитный поток в сердечнике однофазного трансформатора при синусоидальном напряжении питания?
- 2) От чего зависит форма кривой тока х. х.?

3) Как изменяется форма кривой тока х. х. трансформатора с увеличением напряжения питания?

4) Чем объясняется изменение формы кривой тока х. х. при повышении и понижении напряжения питания?

5) Какое соотношение связывает магнитный поток в сердечнике трансформатора с приложенным напряжением?

### *Лабораторная работа 3.5*

## ОСОБЕННОСТИ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Ц е л ь р а б о т ы:** изучить конструкцию магнитной системы трехфазных трансформаторов, ознакомиться с особенностями х. х. трехфазных трансформаторов при различных схемах соединения обмоток, выявить влияние схемы соединения на форму кривой фазных напряжений, закрепить теоретические знания [1, с. 338 – 347, 384 – 389, 400 – 406; 2, с. 245 – 248, 264 – 267; 3, с. 188 – 189, 195 – 199].

### **3.5.1. Основные положения теории**

По конструкции сердечника трехфазные трансформаторы можно разделить на две группы: с независимой (автономной) магнитной системой и со связанной (общей).

Большее применение нашли трансформаторы со связанной магнитной системой, когда обмотки каждой фазы располагаются на отдельных стержнях, соединенных между собой ярмами в общую магнитную систему (рис. 10). Такая конструкция магнитопровода называется стержневой.

Самой распространенной является трехстержневая конструкция сердечника трансформатора (рис. 10, а). В некоторых специальных случаях используется пятистержневая система (бронестержневые сердечники, рис. 10, б).

Принципиальная разница между групповым и стержневым трансформаторами заключается в том, что у первого магнитный поток каждой фазы замыкается по своему отдельному магнитопроводу, тогда как у стержневого

потоки всех трех фаз замыкаются по общему сердечнику. Это вносит некоторые различия в работу трансформаторов в режиме х. х. и при несимметричных режимах.

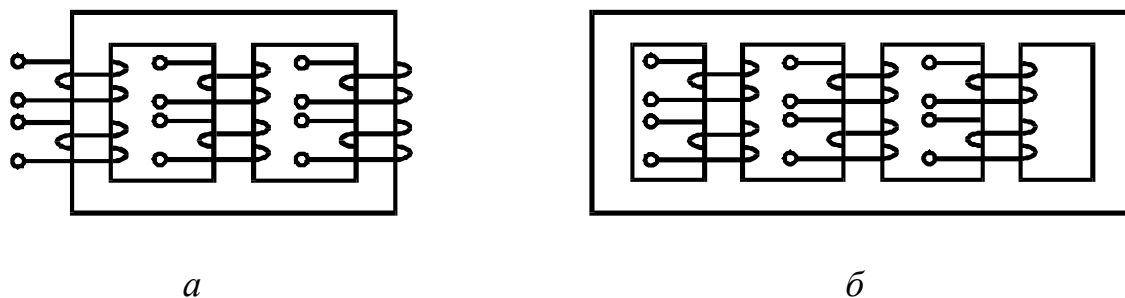


Рис. 10. Конструкция сердечника трансформатора: стержневого (а) и бронестержневого (б)

В лабораторной работе 4 было установлено, что при синусоидальном магнитном потоке ток х. х. несинусоидален и содержит в своем составе третью гармоническую составляющую.

Рассмотрим работу трансформаторов в режиме х. х. при различных магнитных системах и различных схемах соединения обмоток.

**Схема Y/Y.** При соединении обмоток звездой для третьей гармоники тока х. х. нет пути, так как в любой момент времени третья гармоника тока любой фазы направлена либо к нулевой точке, либо от нее. Отсутствие третьей гармонической составляющей тока вызывает искажение магнитного потока, поскольку при этом в его составе появится третья гармоника (рис. 11, а). Если трансформатор представляет собой группу однофазных трансформаторов, то третья гармоника магнитного

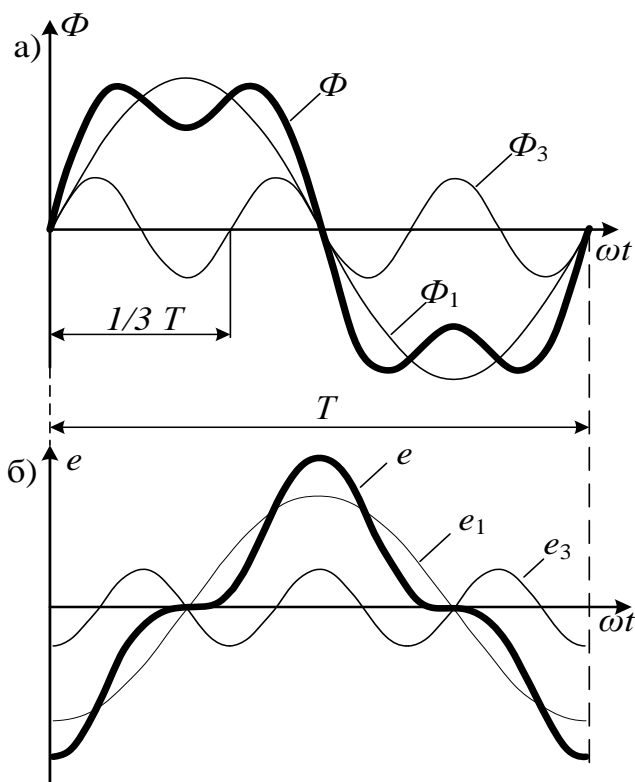


Рис. 11. Форма кривой потока (а) и ЭДС (б)



потока  $\Phi_3$  каждой фазы замыкается по своему сердечнику, магнитное сопротивление которого невелико, вследствие чего амплитуда  $\Phi_3$  может достигать 15 – 20 % от основной волны  $\Phi_1$ .

Каждая составляющая потока ( $\Phi_1, \Phi_3$ ) создает в обмотках трансформатора соответствующую ЭДС, отстающую от потока на четверть периода (рис. 11, б). При нормальном насыщении сердечника амплитуда третьей гармоники ЭДС  $e_3$  может достигать 45 – 60 % от амплитуды основной волны ЭДС  $e_1$ . При сложении той и другой составляющих форма кривой фазных ЭДС резко искажается, амплитуда результирующей ЭДС также возрастает на 45 – 60 %, а ее действующее значение – на 10 – 17 % (см. рис. 11. б). Такое повышение напряжения при х. х. нежелательно и опасно в эксплуатационных условиях, так как может привести к повреждению изоляции и выходу из строя электроустановок.

Подобная картина будет наблюдаться и при эксплуатации трехфазных трансформаторов при схеме Y/Y с бронестержневой магнитной системой. В этом случае третья гармоника магнитного потока каждой фазы замыкается по боковым ярмам (стержням) магнитопровода.

При трехстержневой магнитной системе третья гармоника магнитного потока не имеет пути по магнитопроводу и замыкается по маслу, воздуху, стенкам бака, т. е. по среде с малой магнитной проницаемостью. В связи с этим значение третьей гармоники магнитного потока каждой фазы оказывается незначительным и практически не приводит к искажению формы кривой ЭДС.

Вместе с тем наличие даже небольшого магнитного потока утроенной частоты в стенках бака, стяжных элементах (ярмовых балках, шпильках) вызывает дополнительные потери, увеличивает нагрев трансформатора и снижает его КПД.

*Схема  $\Delta/Y$ .* При соединении первичной обмотки по схеме  $\Delta$  третья гармоника тока х. х. свободно замыкается по обмоткам трансформатора. Следовательно, магнитный поток и ЭДС сохраняют синусоидальную форму, т. е. нет неблагоприятных явлений, рассмотренных выше.

*Схема Y/ $\Delta$ .* В этом случае в сердечнике трансформатора также появляется третья гармоника магнитного потока и наводится третья гармоника ЭДС во вторичной обмотке. Поскольку вторичная обмотка соединена по схеме  $\Delta$ , ЭДС  $e_{23}$

создает во вторичной обмотке ток  $i_{23}$ , циркулирующий внутри схемы  $\Delta$ . В свою очередь ток  $i_{23}$  создает свой магнитный поток  $\Phi_{23}$ , который оказывается направленным почти встречно первоначальному потоку  $\Phi_3$ . Результирующий поток в сердечнике и, следовательно, ЭДС обмоток остаются практически синусоидальными.

Таким образом, наличие в схеме соединения обмоток по схеме  $\Delta$  ослабляет вредное воздействие третьей гармонической магнитного потока и ЭДС.

В трансформаторах большой мощности и высокого напряжения по ряду причин иногда необходимо иметь соединение  $Y/Y_0$  на обеих сторонах. В этом случае часто выполняется еще одна обмотка, соединенная по схеме  $\Delta$  и не несущая электрической нагрузки. Эта обмотка предназначена лишь для улучшения формы кривой ЭДС.

Во всех рассмотренных случаях линейное напряжение, представляющее собой разность фазных напряжений, остается синусоидальным, поскольку третья гармоника фазного напряжения уничтожается.

### **3.5.2. Экспериментальная часть**

1) Снять кривые фазного и линейного напряжения при различных схемах соединения обмоток трансформатора.

2) Снять кривую третьей гармоники ЭДС в обмотке, соединенной по схеме  $\Delta$ .

### **3.5.3. Расчеты и построения**

1) Зарисовать с экрана осциллографа экспериментальные кривые.

2) Рассчитать значение третьей гармоники фазного напряжения при соединении обмоток  $Y/Y$ .

3) Построить расчетную кривую фазного напряжения любой из сторон треугольника.

4) Сравнить расчетную и экспериментальную кривые фазного напряжения.

### 3.5.4. Методические рекомендации к проведению исследований

Опыт проводится на трех однофазных трансформаторах или на трехфазном бронестержневом трансформаторе. Для выполнения экспери-

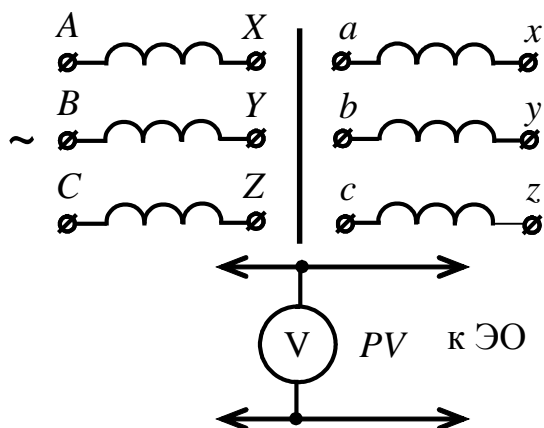


Рис. 12. Электрическая схема для проведения опыта

ментальной части необходимо соединить обмотки трансформатора по схеме Y/Y (рис. 12). Вольтметр и осциллограф включаются по мере необходимости на фазное или линейное напряжение первичной и вторичной обмоток путем прикосновения к соответствующим зажимам схемы. *Будьте внимательны и осторожны!* Показания вольтметра записываются в табл. 8. Форма кривой напряжения зарисовывается с экрана осциллографа на кальку или прозрачную бумагу.

После проведения всех измерений при схеме соединения обмоток Y/Y вторичная обмотка соединяется по схеме  $\Delta$  и опыт повторяется.

Регулировку осциллографа желательно оставить неизменной (в крайнем случае допускается изменение усиления по вертикали).

Для выполнения п. 2 подразд. 5.2 обмотки, соединенные по схеме  $\Delta$ , разрываются в любом месте и к разрыву подключается осциллограф. Частота развертки осциллографа при этом не должна изменяться, а усиление по вертикали при необходимости можно увеличить.

Т а б л и ц а 8

Экспериментальные данные исследования особенностей холостого хода

| Напряжение                  | Схема Y/Y  |            | Схема Y/ $\Delta$ |            |
|-----------------------------|------------|------------|-------------------|------------|
|                             | сторона ВН | сторона НН | сторона ВН        | сторона НН |
| $U_{\text{л}}, \text{В}$    |            |            |                   |            |
| $U_{\text{ф}}, \text{В}$    |            |            |                   |            |
| $U_{\text{л}}/U_{\text{ф}}$ |            |            |                   |            |

Для расчета и построения кривой фазного напряжения при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y прежде всего следует определить действующее значение и амплитуду первой гармонической составляющей, В:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}; \quad (28)$$

$$U_{1m\phi} = \sqrt{2} U_{1\phi} \quad (29)$$

(здесь и далее цифровые индексы означают номер гармоники).

Пренебрегая гармониками более высокого порядка, действующее значение третьей гармоники в составе фазных напряжений вычислить по формуле:

$$U_{3\phi} = \sqrt{U_{\phi}^2 - \left(\frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}\right)^2}, \quad (30)$$

где  $U_{\phi}$  и  $U_{\text{л}}$  – значения фазного и линейного напряжения, полученные в результате опыта, В.

Амплитудное значение третьей гармоники, В,

$$U_{3m\phi} = \sqrt{2} U_{3\phi}. \quad (31)$$

соответственно максимальное (амплитудное) значение результирующего фазного напряжения

$$U_{m\phi} = U_{1m\phi} + U_{3m\phi}. \quad (32)$$

Отсюда можно найти превышение максимальных и действующих значений реального фазного и синусоидального напряжения:

$$\Delta u_{\phi} = \frac{U_{\phi} - U_{1\phi}}{U_{1\phi}}; \quad (33)$$

$$\Delta u_{m\phi} = \frac{U_{m\phi} - U_{1m\phi}}{U_{1m\phi}} \cdot 100 \% = \frac{U_{3m\phi}}{U_{1m\phi}} \cdot 100 \%. \quad (34)$$

Расчетные данные записываются в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

Результаты расчета гармоник  
фазного напряжения при соединении Y/Y

| $U_{л},$<br>В | $U_{1\phi},$<br>В | $U_{1m\phi},$<br>В | $U_{3\phi},$<br>В | $U_{3m\phi},$<br>В | $U_{m\phi},$<br>В | $\Delta u_{m\phi},$<br>% | $\Delta u_{\phi},$ % |
|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|
|               |                   |                    |                   |                    |                   |                          |                      |

На основании расчета для одной из сторон трансформатора необходимо построить первую и третью гармоники напряжения и путем сложения их – кривую результирующего фазного напряжения (см. рис. 11, б).

В отчете должны быть даны письменные ответы на контрольные вопросы 1, 4 – 6, 8, 9.

### 3.5.5. Контрольные вопросы

- 1) Какие магнитные системы трехфазных трансформаторов существуют?
- 2) Что означает термин «групповой трансформатор»?
- 3) Чем отличаются друг от друга стержневая и бронестержневая магнитные системы трехфазных трансформаторов?
- 4) По какому пути замыкается третья гармоническая магнитного потока в групповом, стержневом и бронестержневом трансформаторе?
- 5) Почему искажается форма кривой магнитного потока при соединении обмоток трехфазного трансформатора по схеме Y/Y?
- 6) Почему при соединении обмоток трехфазного группового трансформатора по схеме Y/Y в режиме х. х. возрастает амплитуда фазного напряжения?
- 7) Какова форма кривой фазного напряжения в трехфазном трансформаторе в режиме х. х. при соединении обмоток по схеме Y/Y?
- 8) Почему при соединении одной из обмоток трехфазного группового трансформатора по схеме Δ кривая фазного напряжения остается синусоидальной?

9) При каком соединении обмоток (Y/Y, Y/Δ, Δ/Y) трехфазного пяти-  
стержневого трансформатора в режиме х. х. будет наблюдаться искажение  
формы кривой фазного напряжения?

10) Почему в составе линейного напряжения отсутствуют гармоники с  
порядком, кратным трем?

11) В чем заключается опасность режима х. х. группового трехфазного  
трансформатора при соединении его обмоток по схеме Y/Y?

12) Почему при схеме соединения обмоток трехфазного трансформатора  
по схеме Y/Y при автономной магнитной системе нарушается соотношение  
 $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$ ?

13) Почему при трехстержневой магнитной системе и соединении  
обмоток по схеме Y/Y возрастают дополнительные потери х. х.?

#### Библиографический список

1. В о л ь д е к А. И. Электрические машины. Введение в электротех-  
нику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А. И. В о л ь д е к,  
В. В. П е т р о в. СПб: Питер, 2007. 319 с.

2. К о п ы л о в И. П. Электрические машины / И. П. К о п ы л о в.  
М.: Высшая школа, 2000. 607 с.

3. К о с т е н к о М. П. Электрические машины / М. П. К о с т е н к о,  
Л. М. П и о т р о в с к и й. Л.: Энергия, 1973. Ч. 1. 544 с.; Ч. 2. 648 с.

4. В о л ь д е к А. И. Электрические машины / А. И. В о л ь д е к.  
Л.: Энергия, 1978. 832 с.

5. В и н о к у р о в В. А. Электрические машины железнодорожного  
транспорта / В. А. В и н о к у р о в, Д. А. П о п о в. М.: Транспорт, 1986. 512 с.

*Учебное издание*

АВИЛОВ Валерий Дмитриевич, ИВАНИЛОВ Юрий Леонидович,  
СЕРГЕЕВ Роман Владимирович, СЕРКОВА Любовь Ефимовна,  
ТРЕТЬЯКОВ Евгений Александрович, ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич,  
ШКОДУН Павел Константинович

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

### *Часть 1*

ТРАНСФОРМАТОРЫ  
Учебно-методическое пособие

---

Редактор Т. С. Паршикова

\* \* \*

Подписано в печать .01.2015. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,7.  
Тираж 400 экз. Заказ .

\*\*

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа  
Типография ОмГУПСа

\*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35