

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА

*Цель работы:* изучить назначение активных частей трансформатора: магнитопровода и обмоток, и их исполнение. Изучить схемы соединения обмоток и их маркировку.

### *Основные теоретические сведения*

Активными частями трансформатора являются магнитопровод и обмотки.

*Магнитопровод* (сердечник из электротехнической стали) в трансформаторе выполняет четыре функции:

- образует магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора;
- служит для увеличения основного магнитного потока трансформатора в 500...5000 раз;
- является основой для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей;
- является радиатором для себя и для обмоток из-за своих больших габаритов и массы.

Элементы магнитопроводов электрических машин (сердечники трансформаторов, статоров машин переменного тока, якорей машин постоянного тока и т.п.) подвержены перемагничиванию, что вызывает потери энергии на вихревые токи и гистерезис. Поэтому к магнитным материалам, из которых изготовлены такие элементы магнитопроводов, предъявляются требования: минимальные потери от перемагничивания  $\Delta P_{\text{ХХ}}$  и повышенное удельное электрическое сопротивление, что способствует уменьшению потерь от вихревых токов.

Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т.е. он состоит из тонких пластин холоднокатанной электротехнической стали толщиной 0,5...2 мм.

Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи (токи Фуко), наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Стальные пластинки между собой изолируются посредством:

- окалины — наиболее предпочтительна, т.к. обладает меньшей толщиной, технологически легче получить, дешевле в производстве;
- электротехнического лака;
- электротехнической бумаги.



Преимущества меди по сравнению с алюминием:

- повышенная плотность тока в обмотках за счёт меньшего удельного электрического сопротивления (табл. 2.1);
- повышенная механическая прочность — медь более пластична, следовательно, можно изготовить проводник меньшего сечения, а также более устойчива к действию электродинамических сил от токов короткого замыкания;
- медь лучше подвергается пайке;
- обладает лучшей адгезией к изоляционным материалам (лаку).

Таблица 2.1. Удельное электрическое сопротивление проводниковых материалов

Материал	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , $10^{-6}$ Ом·м, при температуре, °С			Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>
	20	75	115	
Медь Cu	0,0175	0,0213	0,0244	0,089
Алюминий Al	0,0294	0,0375	0,0400	0,0265

Недостатки меди:

- высокая стоимость;
- большая плотность, как следствие — большая масса обмоток (см. табл. 2.1).

Преимущества алюминия:

- материал более лёгкий;
- материал более дешёвый, чем медь.

Недостатки алюминия:

- малая плотность тока при том же сечении, что и у медного проводника;
- ломкость;
- плохо подвергается пайке.

С точки зрения потерь мощности и потерь напряжения в трансформаторе также предпочтительно использовать медь, поскольку сопротивление проводника зависит от удельного сопротивления:

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление, Ом·мм<sup>2</sup> / м;  
 $l$  — длина проводника, м;  
 $S$  — сечение проводника, мм<sup>2</sup>.

Потери мощности  $\Delta P$ , Вт, и напряжения  $\Delta U$ , В, в трансформаторе:

$$\Delta P = I^2 R_T, \quad \Delta U = I Z_T,$$

где  $R_T$  — активное сопротивление обмотки, Ом;

$Z_T$  — полное сопротивление обмотки, Ом.

Диаметр обмоточных проводов может быть 0,5...2,5 мм, в случае круглого сечения. На большие токи сечение проводников обмоток выполняется в виде шинки прямоугольного сечения. Соответственно в зависимости от сечения проводника и его материала изменяется и плотность тока в обмотке (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Плотность тока в обмотках силовых трансформаторов

Тип трансформатора	Плотность тока $J$ , А/мм <sup>2</sup> , в проводнике из материала:	
	алюминий	медь
Сухие	1...1,5	2...2,5
Масляные	2	4...4,5

Обмотки трансформатора выполняются с учетом возникающих в них электродинамических сил. Как известно, при протекании тока по проводнику, вокруг него возникают силовые линии магнитной индукции  $B$ , направление которых определяется по правилу правого винта (рис. 2.2).

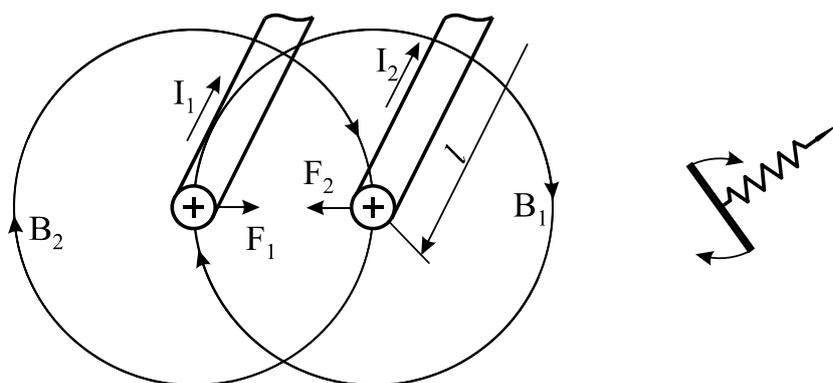


Рис. 2.2. Направление сил в проводнике

При этом в проводнике возникает электродинамическая сила:

$$F = BLI, \text{ Н.}$$

Направление силы определяется по правилу левой руки. При токах короткого замыкания, превышающих номинальные токи в 20...25 раз, электродинамические силы между соседними проводниками возрастают в 400...625 раз и вызывают механические разрушения в трансформаторе.

## Схемы соединения обмоток

Обмотки трансформатора предназначены для протекания в них тока  $I_1, I_2$ , создания магнитодвижущих сил (МДС)  $F_1, F_2$  и электродвижущих сил (ЭДС)  $E_1, E_2$ . Магнитный поток, создаваемый током в обмотках, пропорционален намагничивающей магнитодвижущей силе  $\Phi \equiv F, A \cdot \text{виток}$ . Направление МДС определяется по правилу левой руки, а её величина  $F, A \cdot \text{виток}$ , выражением:

$$F = Iw.$$

Начало и конец обмотки может обозначаться буквами, звездочкой либо точкой (рис. 2.3).

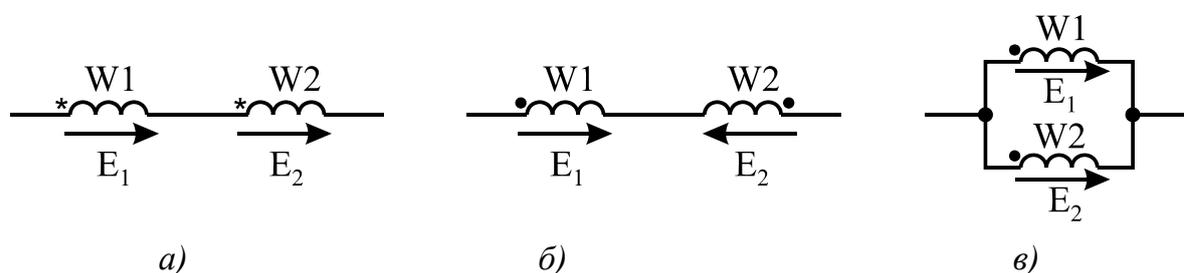


Рис. 2.3. Включение обмоток:

*а* — последовательно согласно и *б* — последовательно встречно;  
*в* — параллельно согласно

При этом обмотки могут соединяться:

- последовательно:
  - согласно — когда ЭДС каждой обмотки направлена в одну сторону, т.е. конец первой обмотки соединен с началом второй обмотки (рис. 2.3, *а*);
  - встречно — когда ЭДС каждой обмотки направлена встречно друг другу, конец первой обмотки соединен с концом второй обмотки (рис. 2.3, *б*);
- параллельно:
  - соединяются только согласно — когда ЭДС каждой обмотки направлена в одну сторону, т.е. начало первой обмотки соединяется с началом второй обмотки (рис. 2.3, *в*).

В зависимости от соединения обмоток существуют следующие основные схемы соединения обмоток силовых трансформаторов:

- звезда — Y (рис. 2.4, *а*);
- звезда с нулем — Y<sub>н</sub> (рис. 2.4, *а*);
- треугольник — Д (рис. 2.4, *б*);
- зигзаг с нулем — Z<sub>н</sub> (рис. 2.4, *в*).

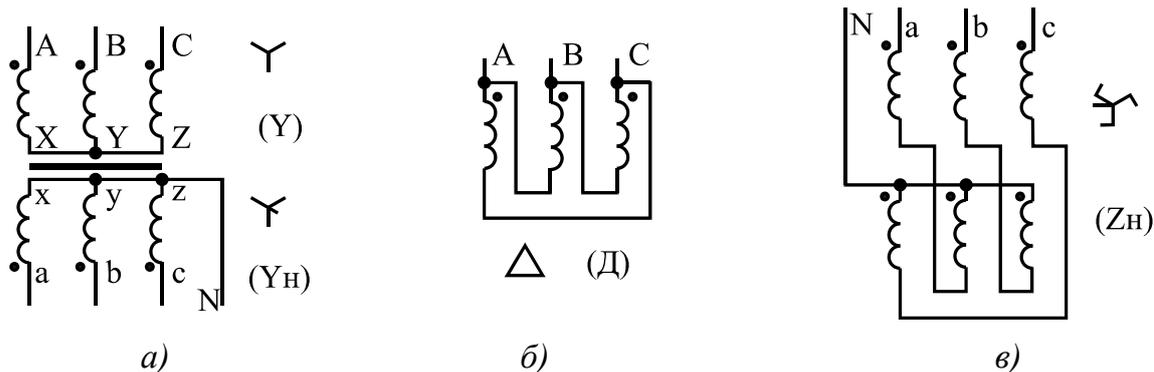


Рис. 2.4. Маркировка и схемы соединения обмоток силовых трансформаторов:  
 а — звезда – звезда с нулем; б — треугольник; в — зигзаг

### Соотношения токов, напряжений и мощностей в схемах звезда, треугольник и зигзаг

В зависимости от соединения обмоток трансформатора (рис. 2.4), соотношение токов и напряжения в схеме может быть разное.

При соединении обмоток в звезду либо в звезду с нулем (рис. 2.5) соотношение напряжений и токов следующее:

$$U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}, \quad I_{Л} = I_{\phi},$$

где  $U_{Л}$  — линейное напряжение (между линейными проводами), В;  
 $U_{\phi}$  — фазное напряжение (между началом и концом фазы), В;  
 $I_{Л}$  — линейный ток (текущий по линейному проводу), А;  
 $I_{\phi}$  — фазный ток (ток, протекающий от начала к концу фазы), А.

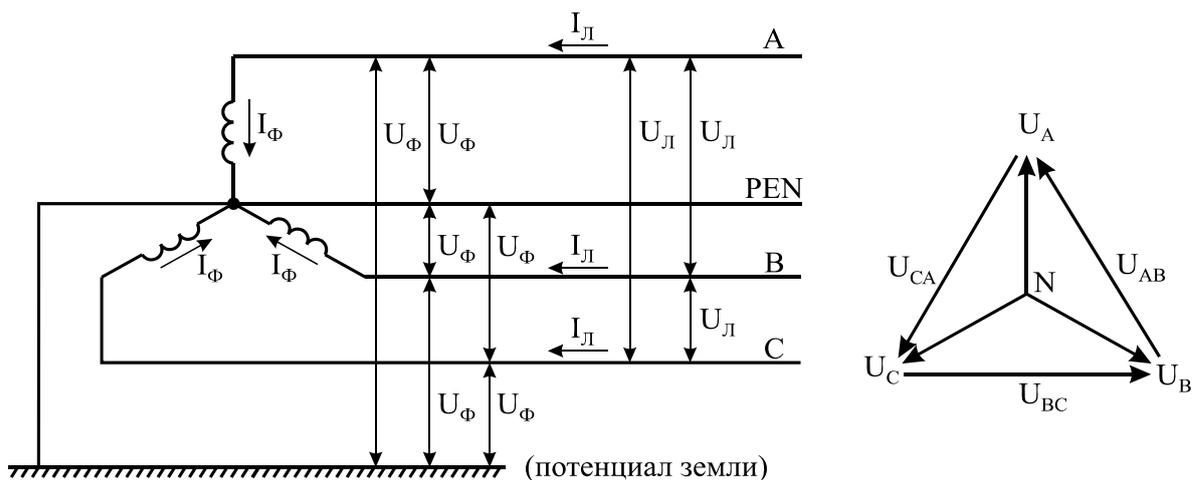


Рис. 2.5. Соединение обмоток трансформатора в звезду с нулём

Схема соединения в звезду с нулем используется в сетях 0,4 кВ для обеспечения питанием трёхфазных и однофазных потребителей на напряжение 380 и 220 В соответственно.

В данной схеме (рис. 2.5), помимо фазных проводников, есть ещё и совмещенный нулевой рабочий и защитный проводник PEN, предназначенный для обеспечения: электробезопасности обслуживающего персонала, питания однофазных потребителей, выравнивания фазного напряжения при несимметричной нагрузке фаз.

При переменном трёхфазном токе проводники в схемах, помимо буквенного, имеют также и цветовое обозначение:

- фазы А, В, С — жёлтый, зелёный, красный цвета соответственно;
- нулевой рабочий проводник N — голубым цветом;
- нулевой защитный проводник PE — чередующимися продольными или поперечными полосами одинаковой ширины жёлтого и зелёного цветов;
- совмещенный нулевой рабочий и защитный проводник PEN — голубой цвет по всей длине и жёлто-зелёные полосы на концах проводника.

Соотношение мощностей (рис. 2.6):

$$S = \sqrt{3} U_{л} I_{л}; \quad P = S \cos(\varphi); \quad Q = S \sin(\varphi),$$

где  $S$  — полная мощность, ВА;

$P$  — активная мощность, Вт;

$Q$  — реактивная мощность, вар.

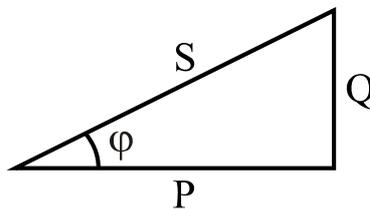


Рис. 2.6. Треугольник мощностей

В схеме соединения обмоток зигзаг с нулем (см. рис. 2.4, в) соотношение токов, напряжений и мощностей аналогично схеме соединения обмоток в звезду. Соединение обмоток трансформатора в зигзаг используется для выравнивания фазного напряжения при несимметричной нагрузке и даже в случае обрыва линейного провода со стороны высшего напряжения 10 кВ, а также для повышения чувствительности релейной защиты к токам однофазного короткого замыкания. Но у такой схемы существуют свои недостатки:

- количество витков в фазе увеличено на 15%, в отличие от схемы звезда, соответственно увеличиваются габариты обмоток, изоляции, а также увеличивается вес трансформатора;
- усложняется схема соединений;
- увеличивается стоимость трансформатора.

Соединение обмоток трансформаторов в звезду без нулевого провода и в треугольник (рис. 2.7) используется в сетях 35 и 10 кВ.

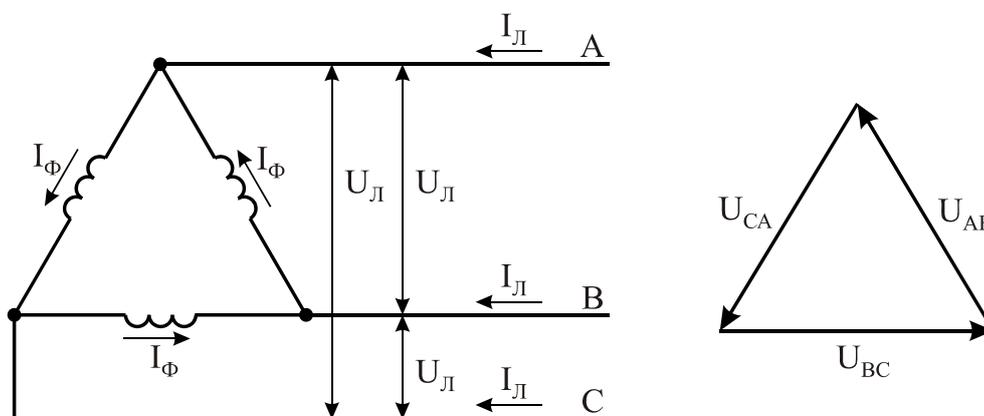


Рис. 2.7. Схема соединения обмоток трансформатора в треугольник

При соединении обмоток в треугольник соотношение напряжений и токов следующее:

$$U_{л} = U_{\phi}, \quad I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}, \quad A.$$

#### Порядок выполнения работы

1. Определить у сухого однофазного трансформатора где первичная и вторичная обмотки. Произведя соответствующие измерения вычислить коэффициент трансформации трансформатора.
2. Произвести соединение обмоток сухого трёхфазного трансформатора по схеме звезда-звезда. Соединить нагрузки на стенде по схеме звезда. Произвести измерение фазных и линейных токов и напряжений в нагрузке.
3. Произвести соединение обмоток сухого трёхфазного трансформатора по схеме звезда-звезда. Соединить нагрузки на стенде по схеме треугольник. Произвести измерение фазных и линейных токов и напряжений в нагрузке.

#### Содержание отчёта

1. Назначение магнитопровода трансформатора.
2. Классификация обмоток трансформатора.
3. Схемы при соединении нагрузок в треугольник и звезду.
4. Результаты измерений фазных и линейных токов и напряжений.

### *Контрольные вопросы*

1. Для чего предназначен магнитопровод?
2. Из чего выполняется магнитопровод?
3. Поясните назначение и исполнение обмоток трансформатора.
4. Перечислите достоинства и недостатки медной обмотки в сравнении с алюминиевой.
5. Каким образом формула  $R = \rho \frac{l}{S}$  определяет потери напряжения, и потери мощности в обмотках?
6. Как выполняется маркировка обмоток трансформаторов?
7. Приведите схемы соединений однофазных и трёхфазных обмоток.
8. В чем отличие последовательного, согласного и встречного соединения обмоток?
9. Покажите направление векторов ЭДС в схемах соединения обмоток.
10. Опишите условия параллельного соединения двух и более обмоток.
11. Приведите соотношение токов, линейных и фазных напряжений, мощностей  $P$ ,  $Q$ ,  $S$  для схемы соединения в треугольник.
12. Приведите соотношение токов, линейных и фазных напряжений, мощностей  $P$ ,  $Q$ ,  $S$  для схемы соединения в звезду.
13. Приведите достоинства и недостатки следующих схем соединения обмоток трансформаторов: звезда, треугольник, зигзаг.