

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ  
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ  
ФГБОУ ВО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Д.М. ОЛИН, М.С. ЁТОВ

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

## **Часть I. Трансформаторы**

Лабораторный практикум  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,  
профиль «Электроснабжение»  
очной и заочной форм обучения

*2-е издание,  
переработанное и дополненное*

КАРАБАЕВО  
Костромская ГСХА  
2015

УДК 621.314.2  
ББК 31.261.8  
О 54

*Авторы:* сотрудники кафедры электроснабжения Костромской ГСХА  
к.т.н., доцент *Д.М. Олин* и ст. преподаватель *М.С. Ётов*.

*Рецензент:* к.т.н., доцент кафедры электропривода и электротехнологии  
Костромской ГСХА *В.И. Мазерин*.

*Рекомендовано к изданию методической комиссией  
факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства,  
протокол № 4 от 12 мая 2015 г.*

О 54 **Олин, Д.М.** Электрические машины. Ч. I. Трансформаторы : лабораторный практикум для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / Д.М. Олин, М.С. Ётов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 58 с.

В лабораторном практикуме представлены основные теоретические сведения по трансформаторам, необходимые для понимания и выполнения лабораторных работ, а также контрольные вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения материала студентами.

Лабораторный практикум по дисциплине «Электрические машины» предназначен для самостоятельной работы студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения.

УДК 621.314.2  
ББК 31.261.8

© ФГБОУ ВПО Костромская ГСХА, 2011  
© ФГБОУ ВО Костромская ГСХА, 2015, перераб. и доп.  
© Д.М. Олин, М.С. Ётов, 2015  
© РИО Костромской ГСХА, оформление, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Общие требования по технике безопасности.....	5
Лабораторная работа 1 Общие сведения о трансформаторах.....	6
Лабораторная работа 2 Устройство трансформатора.....	14
Лабораторная работа 3 Исследование однофазного трансформатора.....	23
Лабораторная работа 4 Т-образная схема замещения трансформатора.....	31
Лабораторная работа 5 Энергетическая и векторная диаграммы трансформатора.....	34
Лабораторная работа 6 Параллельная работа трансформаторов.....	40
Лабораторная работа 7 Специальные трансформаторы.....	46
Список использованных источников.....	57

## ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины применяются в различных областях жизнедеятельности человека. К числу таких электрических машин относятся трансформаторы, являющиеся статическими электромагнитными устройствами. Трансформаторы используются в основном для согласования напряжения источника питания, например генератора, с потребителем электрической энергии, т.е. позволяют пропорционально снизить или увеличить ток или напряжение. Все трансформаторы можно разделить на две большие группы: силовые общего назначения и специальные, которые в свою очередь разделяются на трансформаторы трехфазного и однофазного исполнения.

Для будущего инженера-электрика важно понимать и знать как принцип работы электрических машин, так и их устройство. В лабораторном практикуме представлены методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электрические машины» раздел «Трансформаторы», позволяющие студентам самостоятельно исследовать данный тип электрических машин. Лабораторные работы содержат краткие теоретические сведения, необходимые формулы и иллюстрации, а также порядок выполнения работы и контрольные вопросы для самопроверки.

Лабораторный практикум предназначен для студентов 3-го курса факультета «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» и направления подготовки «Агроинженерия» очной формы обучения.

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ**

1. Перед началом работы необходимо убедиться в исправности лабораторного оборудования, на котором предстоит работать. О замеченных неисправностях сообщить преподавателю или лаборанту.

2. Перед началом сборки схемы необходимо убедиться в том, что стенд выключен.

3. После сборки схемы необходимо представить её на проверку преподавателю. Включать схему без проверки преподавателем запрещается.

4. При появлении во время работы искр, треска, дыма или других признаков сбоев в работе оборудования немедленно выключить главный автоматический выключатель стенда и сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

5. Запрещается студентам самостоятельно устранять неисправности электрооборудования.

6. При возникновении несчастного случая в лаборатории следует сообщить преподавателю или лаборанту.

7. Разбирать схему разрешается только после проверки преподавателем результатов лабораторных исследований.

8. После окончания работы необходимо выключить лабораторные стенды и главный автоматический выключатель лаборатории. Привести в порядок рабочее место. Установить приборы и оборудование на исходные места

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ

*Цель работы:* изучить назначение трансформаторов и их классификацию.

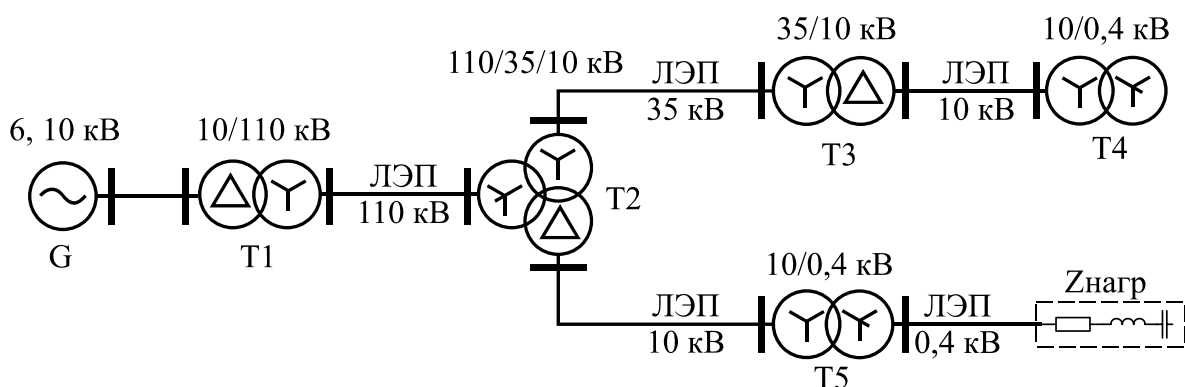
### *Основные теоретические сведения*

*Трансформатором* называют статическое электромагнитное устройство переменного тока (без вращающихся частей), предназначенное для преобразования электрической энергии одного уровня напряжения в другой (10 кВ/0,4 кВ; 220 В/110 В).

В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться от первичной любыми параметрами: значениями напряжения и тока, числом фаз, формой кривой напряжения (тока), частотой. Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют силовые трансформаторы, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

### Экономия электрической энергии

Напряжение, вырабатываемое генератором, составляет, как правило, 6, 10 кВ, для уменьшения потерь энергии напряжение вначале повышают для передачи на большие расстояния, а затем уменьшают для питания потребителей (рис. 1.1).



*Рис. 1.1. Система электроснабжения*

Полная мощность:	$S = UI, \text{ВА};$
Потери активной мощности:	$\Delta P = I^2 R, \text{Вт};$
Потери напряжения:	$\Delta U = IZ, \text{В}.$

В соответствии с представленными выражениями полной мощности, потерями мощности и напряжения можно показать структурно экономию электрической энергии в энергосистеме:

$$S = const \rightarrow U \uparrow \rightarrow I \downarrow$$

$$I \downarrow \rightarrow \Delta P \downarrow$$

$$I \downarrow \rightarrow \Delta U \downarrow$$

### Согласование напряжения сети и нагрузки

Большинство бытовых электроприёмников используют для своего питания напряжение 380/220 В переменного тока, получаемое от трехфазных трансформаторов с глухозаземленной нейтралью (см. рис. 1.1, Т4, Т5) по линиям электропередач. В этом случае трансформатор, понижающий напряжение, например с 10 кВ до 0,4 кВ, выполняет функцию согласования напряжения источника к напряжению потребителя.

### Обеспечение безопасного питания с помощью трансформатора

Так как в трансформаторе первичная и вторичная обмотки электрически разделены сопротивлением изоляции  $R_{ИЗ}$ , то электробезопасность при питании электрооборудования для человека более высокая, нежели при питании непосредственно от трансформатора подстанции, у которого нулевая точка заземлена. В случае, если человек касается оголённого фазного провода (рис. 1.2), то он попадает под фазное напряжение  $U_{\phi}$ .

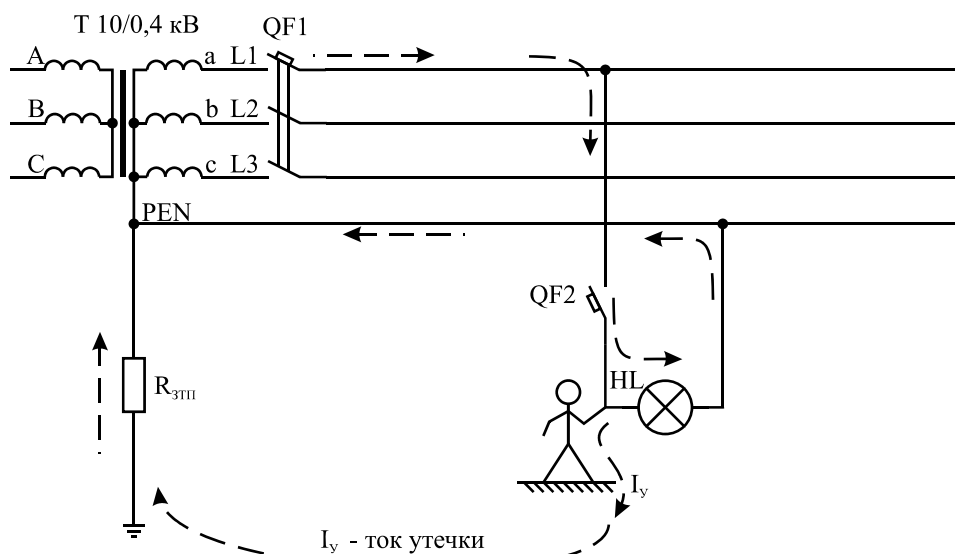


Рис. 1.2. Опасность поражения током при питании потребителя напрямую от трансформатора подстанции

Ток утечки, протекающий через фазу трансформатора, провода, тело человека и заземление подстанции, будет определяться законом Ома. Расчётное сопротивление человека  $R_{ЧЕЛ}$  принимается 1 кОм, сопротивление заземления нейтрали трансформатора на подстанции  $R_{ЗТП} = 4$  Ом.

$$I_{ЧЕЛ} = I_y = \frac{U\phi}{R_{ЧЕЛ} + R_{ЗТП}} = \frac{220}{1000 + 4} = 0,22 \text{ A}.$$

Протекание тока в 220 мА приведёт к летальному исходу (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Влияние тока на организм человека

Нечувствительный ток	0...0,5 мА
Болевой ток	0,5...8 мА
Ток неотпускания	10 мА
Фибрилляционный ток	50 мА
Смертельный ток	100 мА

Если использовать разделительный трансформатор (рис. 1.3), то человек, коснувшись оголённого провода, не ощутит тока, протекающего через него, поскольку магнитное сопротивление разделительного трансформатора Т2 очень большое.

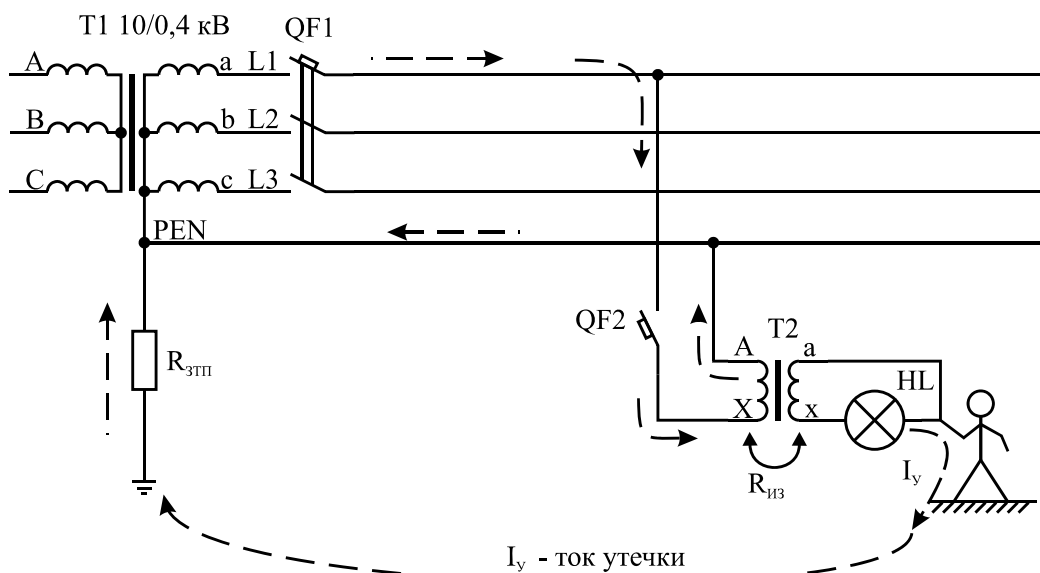


Рис. 1.3. Обеспечение электробезопасности при питании потребителя через разделительный трансформатор



Сопротивление изоляции трансформатора  $R_{ИЗ}$  должно быть не ниже 0,5 МОм. Ток утечки  $I_y$ , протекающий через тело человека, определяется по закону Ома:

$$I_{ЧЕЛ} = I_y = \frac{U_{\phi}}{R_{ИЗ} + R_{ЧЕЛ} + R_{ЗТП}} = \frac{220}{0,5 \cdot 10^6 + 1000 + 4} = 0,000439 \text{ А}.$$

Как видно из таблицы 1.1, ток в 0,439 мА является нечувствительным для человека.

Кроме разделительных трансформаторов, для повышения электробезопасности могут использоваться устройства защитного отключения (УЗО), реагирующие на ток утечки.

### Классификация трансформаторов

Трансформаторы классифицируют по следующим признакам:

- 1) по назначению:
  - а) силовые общего назначения;
  - б) специального назначения:
    - разделительные трансформаторы;
    - измерительные трансформаторы тока;
    - измерительные трансформаторы напряжения;
    - сварочные трансформаторы;
    - выпрямительные трансформаторы;
    - автотрансформаторы;
    - импульсные трансформаторы и др.;
- 2) по числу фаз:
  - а) однофазные (О);
  - б) трёхфазные (Т);
- 3) по системе охлаждения:
  - а) сухие (С);
  - б) масляные (М);
- 4) по числу обмоток, пересекаемых одним магнитным потоком:
  - а) однообмоточные;
  - б) двухобмоточные;
  - в) многообмоточные;
- 5) по типу магнитопровода:
  - а) броневое типа;
  - б) стержневого типа;
  - в) бронестержневого типа.

*Силовые трансформаторы* общего назначения применяются в линиях передачи и распределения электроэнергии, а также в различных электроустройствах для получения требуемого напряжения, например в блоках питания. Трансформаторы специального назначения характеризуются разнообразием рабочих свойств и конструктивного исполнения, и отличаются принципиальными схемами, маркировкой, бирочными данными, режимами работы (ХХ — холостого хода и КЗ — короткого замыкания).

*Разделительные трансформаторы* применяются для разделения электрических цепей с целью обеспечения повышенной электробезопасности. Разделительный трансформатор может быть составлен из двух силовых трансформаторов, один из которых понижает напряжение сети, а второй пропорционально повышает (рис. 1.4, а), что эквивалентно трансформатору, в котором первичная и вторичная обмотки имеют одинаковое количество витков, соответственно на вторичной обмотке наводится напряжение, равное напряжению в первичной обмотке (рис. 1.4, б). Такие трансформаторы устанавливают в помещениях с повышенной влажностью (душевых комнатах).

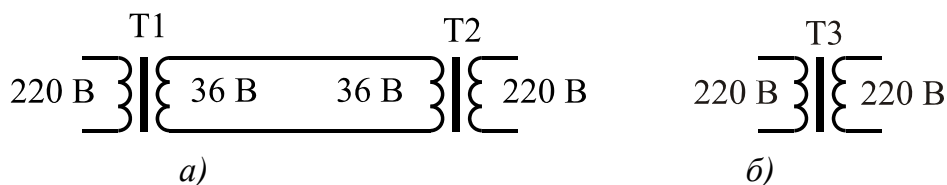


Рис. 1.4. Разделительные трансформаторы:

а — эквивалентная схема; б — условно-графическое обозначение

*Трансформаторы тока* используются для преобразования тока в первичной обмотке в пропорциональное ему напряжение во вторичной. В отличие от силовых трансформаторов, они работают в режиме короткого замыкания. Такие трансформаторы используют в электрических сетях для измерения токов больших величин, а также для устройств питания релейной защиты сетей и трансформаторов от ненормальных режимов работы. К ним подключают приборы учета электрической энергии (амперметры и токовые обмотки ваттметров, фазометров, счетчиков электрической энергии) и устройства релейной защиты.

*Трансформаторы напряжения* также используются для питания приборов учёта электрической энергии и средств релейной защиты сетей и трансформаторов от ненормальных режимов работы. К ним подключают обмотки напряжения вольтметров, частотомеров (герцметров), ваттметров, фазометров, счётчиков электрической энергии и обмотки напряжения устройства релейной защиты.

*Сварочные трансформаторы* — ток вторичной обмотки (сварочный ток) до 1 кА, напряжение холостого хода 60...150 В, крутопадающая внешняя характеристика.

*Выпрямительные трансформаторы*, в отличие от силовых, обладают большими габаритами, чем у силовых трансформаторов такой же выходной мощности, но при синусоидальных токах в обмотках и предназначены для использования в блоках питания постоянного тока различной маломощной аппаратуры. Выбираются с запасом по мощности с учётом коэффициента типовой мощности, в зависимости от выпрямителя (1,05...3).

*Автотрансформаторы* применяются для регулирования напряжения. За счёт гальванической (металлической, электрической) связи обмоток имеют меньшую массу, габариты и цену.

*Охлаждение обмоток и магнитопровода* в трансформаторе осуществляется посредством воздуха (сухие трансформаторы), масла либо сочетания обеих систем охлаждения. Масляное, как и воздушное, охлаждение бывает с естественной и принудительной циркуляцией. Трансформаторное масло обеспечивает изоляцию обмоток между собой и обмоток между сердечником, обеспечивает отвод тепла от обмоток и сердечника, а также является шумоизолятором. К трансформаторному маслу предъявляются следующие требования:

- диэлектрическая прочность — хорошие изоляционные свойства;
- не должно быть увлажненным (силикагель — удаления влаги);
- без различных включений — должно быть чистое.

Последние два требования влияют на изоляционные свойства трансформаторного масла.

По числу обмоток, пересекаемых одним магнитным потоком трансформаторы различают: однообмоточные (рис. 1.5, а); двухобмоточные (рис. 1.5, б); многообмоточные (рис. 1.5, в).

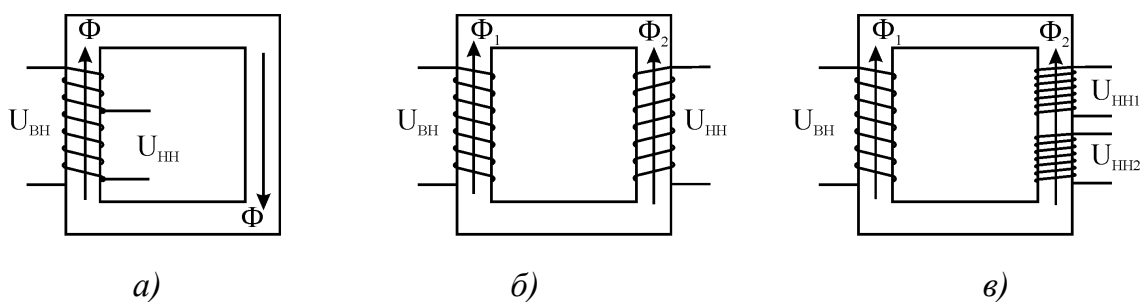


Рис. 1.5. Типы трансформаторов:

а — однообмоточный; б — двухобмоточный; в — многообмоточный

Силовые трансформаторы выполняются с магнитопроводами трёх типов: стержневой — обмотки защищены только с одной стороны (рис. 1.6, а); броневой — обмотки защищены с двух сторон (рис. 1.6, б); бронестержневой — обмотка каждой фазы размещена на отдельном стержне и защищена с двух сторон (рис. 1.6, в).

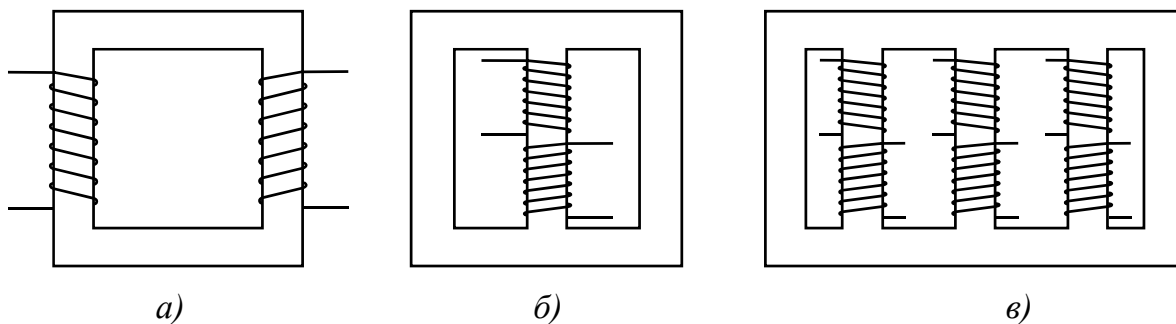


Рис. 1.6. Типы магнитопроводов трансформаторов:  
а — стержневой; б — броневой; в — бронестержневой

Магнитопровод в трансформаторе выполняет несколько функций: составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора; является основой для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей; является радиатором для себя и для обмоток из-за своих больших габаритов и массы.

### *Содержание отчёта*

1. Определение трансформатора и его назначение.
2. Классификация трансформаторов.
3. Данные о воздействии тока на организм человека.

### *Контрольные вопросы*

1. Дайте определение трансформатора.
2. Каково назначение трансформаторов?
3. Посредством чего достигается экономия электрической энергии в электрических сетях?
4. Каким образом обеспечивается согласование напряжения сети и нагрузки?
5. Посредством чего достигается обеспечение безопасного питания потребителей?
6. Нарисуйте схему для обеспечения безопасного питания однофазных потребителей.
7. Как классифицируют трансформаторы?

8. Назовите область применения силовых и специальных, одно- и трёхфазных трансформаторов.
9. Поясните назначение специальных трансформаторов и их особенности.
10. Приведите известную вам марку трансформатора и расшифруйте её.
11. Какова роль трансформаторного масла?
12. Опишите характеристики трансформаторного масла.
13. Какие типы магнитопроводов трансформатора бывают? Назовите их особенности.
14. Назовите функции магнитопровода.

## 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.

Обмотки трансформатора можно классифицировать:

- по назначению:
  - первичная обмотка  $w_1$ , на которую подаётся напряжение;
  - вторичная обмотка  $w_2$ , с которой снимается напряжение;
- по величине напряжения обмотки:
  - высшего напряжения (ВН);
  - среднего напряжения (СН);
  - низшего напряжения (НН).

В зависимости от того, какая обмотка является первичной, а какая вторичной и в зависимости от напряжения на обмотках трансформатор может использоваться для понижения (рис. 2.1, а) или повышения напряжения (рис. 2.1, б). То есть трансформатор является хорошо обратимой электрической машиной.

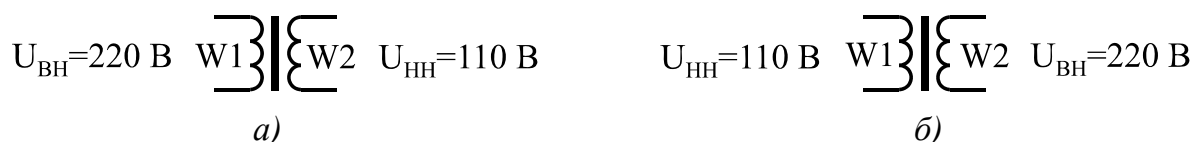


Рис. 2.1. Понижающий (а) и повышающий (б) трансформаторы

Соотношения между параметрами обмоток определяются коэффициентом трансформации:

$$K_{TP} = \frac{E_{BH}}{E_{HH}} = \frac{W_{BH}}{W_{HH}} = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} = \frac{I_{HH}}{I_{BH}};$$

$$K_{TP}^2 = \frac{R_{BH}}{R_{HH}} = \frac{X_{BH}}{X_{HH}} = \frac{Z_{BH}}{Z_{HH}}.$$

*Обмоточные провода*, применяемые в электрических машинах для изготовления обмоток, должны удовлетворять целому комплексу требований:

- малая толщина изоляционного слоя провода;
- высокая механическая прочность и одновременно гибкость металлической жилы провода;
- эластичность, электроизоляционная прочность и нагревостойкость изоляционного покрытия, его высокая теплопроводность (для беспрепятственного отвода теплоты от токоведущей жилы), стойкость лака к растворителям, которым пропитывается обмотка электрической машины.

В качестве проводниковых материалов в электрических машинах широко применяют электротехническую медь  $Cu$  и алюминий  $Al$ .

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).

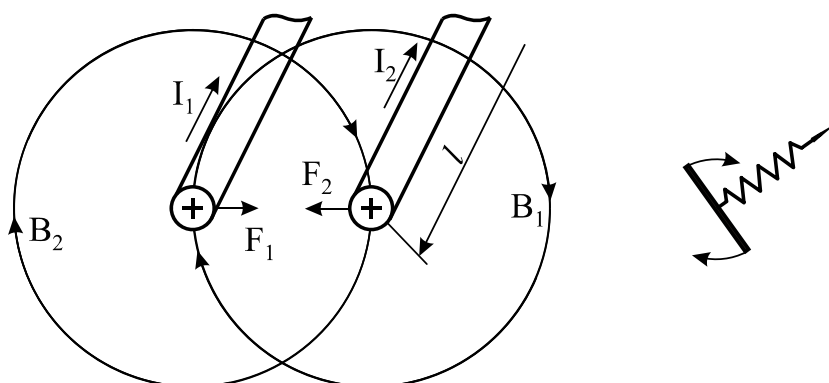


Рис. 2.2. Направление сил в проводнике

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).

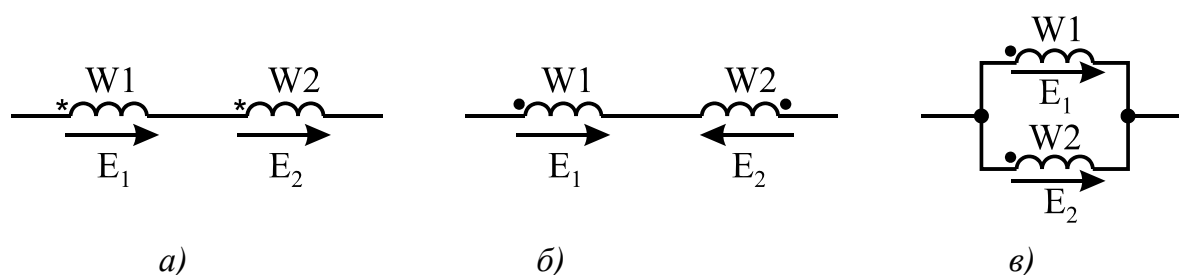


Рис. 2.3. Включение обмоток:

*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*).

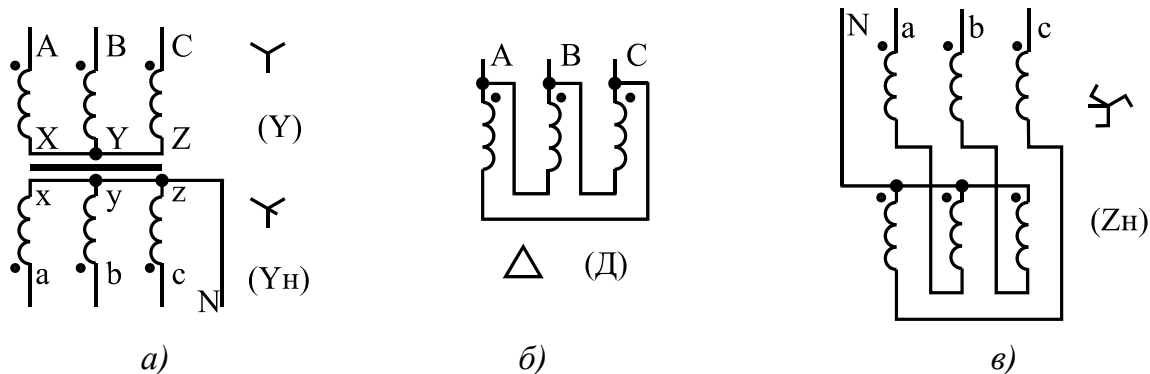


Рис. 2.4. Маркировка и схемы соединения обмоток силовых трансформаторов:  
 а — звезда – звезда с нулем; б — треугольник; в — зигзаг

### 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.

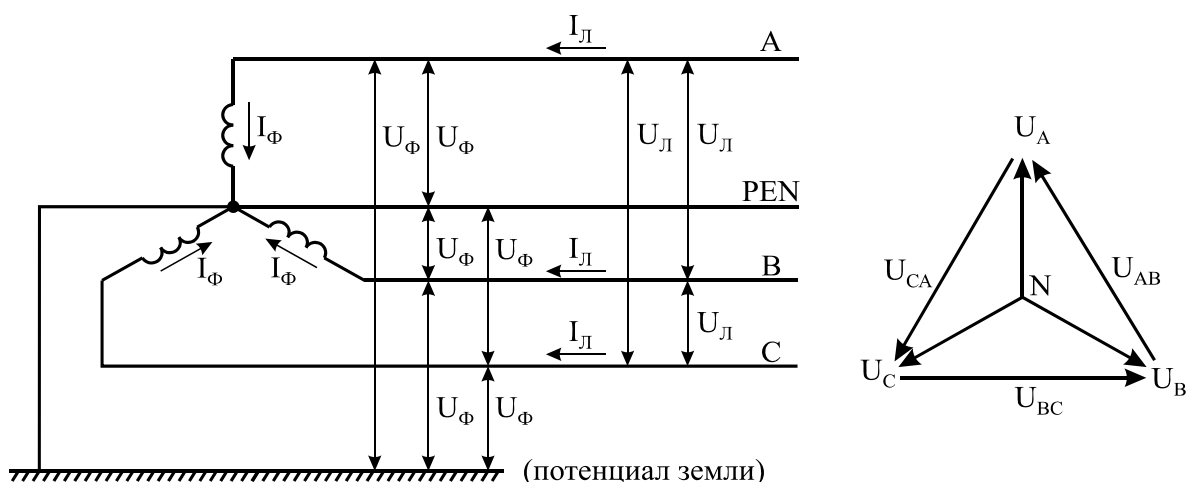


Рис. 2.5. Соединение обмоток трансформатора в звезду с нулём

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.

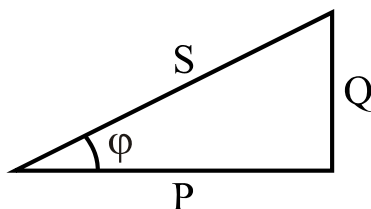


Рис. 2.6. Треугольник мощностей

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.

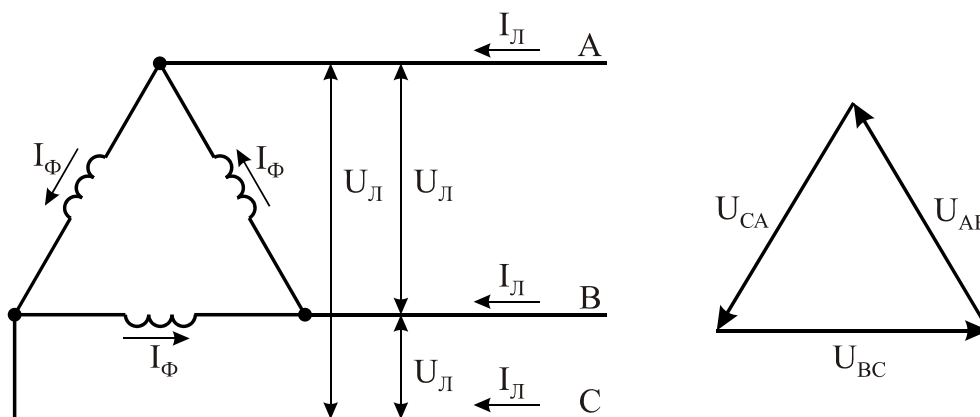


Рис. 2.7. Схема соединения обмоток трансформатора в треугольник

При соединении обмоток в треугольник соотношение напряжений и токов следующее:

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

#### 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.

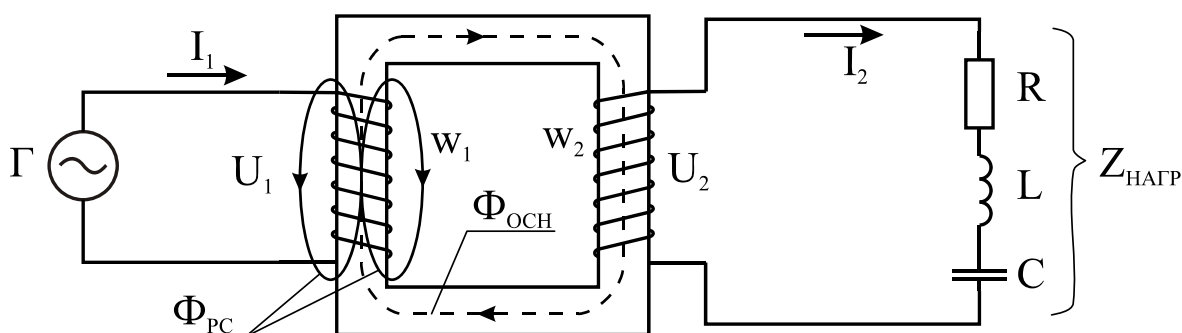
### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

*Цель работы:* исследовать однофазный трансформатор в опытах холостого хода и короткого замыкания, а также снять внешнюю характеристику трансформатора.

#### *Основные теоретические сведения*

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (шихтованная листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 3.1). Одна из обмоток, которую называют первичной, присоединена к источнику переменного тока  $\Gamma$  на напряжение  $U_1$ . К другой обмотке, называемой вторичной, подключен потребитель  $Z_{\text{НАГР}}$ . Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.



*Рис. 3.1. Электромагнитная схема трансформатора*

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки  $w_1$  к источнику переменного тока  $\Gamma$  под действием напряжения  $U_1$  в витках этой обмотки протекает переменный ток  $I_1$ . При отсутствии нагрузки на вторичной обмотке  $w_2$  этот ток будет являться током холостого хода, а его действующее значение будет зависеть от сопротивления трансформатора:

$$I_{\text{ХХ}} = I_0 = \frac{U_1}{Z_T}.$$

Этот ток создает основной магнитный поток  $\Phi_{осн}$  и магнитный поток рассеяния  $\Phi_{РС}$ , при этом  $\Phi_{осн} \gg \Phi_{РС} \approx 0$ . Замыкаясь в магнитопроводе, основной магнитный поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них электродвижущие силы ЭДС:

– в первичной обмотке ЭДС *самоиндукции*:

действующее значение	мгновенное значение
$E_1 = 4,44\Phi f w_1$	$e_1 = -w_1 \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)$

– во вторичной обмотке ЭДС *взаимоиндукции*:

действующее значение	мгновенное значение
$E_2 = 4,44\Phi f w_2$	$e_2 = -w_2 \left( \frac{d\Phi}{dt} \right)$

При подключении нагрузки  $Z_{НАГР} (R, X_L, X_C)$  к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС  $E_2$  в цепи этой обмотки создается вторичный ток  $I_2$  — ток нагрузки, а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение  $U_2$ . Действующее значение тока во вторичной обмотке определяется законом Ома:

$$I_n = I_2 = \frac{E_2}{Z_T + Z_{НАГР}} = \frac{U_2}{Z_{НАГР}}$$

Ток  $I_2$  создает свой магнитный поток  $\Phi_2$ , направленный встречно  $\Phi_1$ . В результате основной магнитный поток будет складываться из двух магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , направленных встречно, и будет равен магнитному потоку трансформатора в режиме холостого хода:

$$\Phi_{осн} = \Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_{ХХ} = \text{const.}$$

Из уравнений ЭДС видно, что  $e_1$  и  $e_2$ , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счёт разного числа витков  $w_1$  и  $w_2$  в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

$$K_{ТР} = \frac{E_{ВН}}{E_{НН}} = \frac{W_{ВН}}{W_{НН}} = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = \frac{I_{НН}}{I_{ВН}}$$



В повышающих трансформаторах  $U_2 > U_1$ , а в понижающих  $U_1 > U_2$ . Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, — *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Трансформаторы обладают свойством обратимости, один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо — понижающий.

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению  $\left(\frac{d\Phi}{dt} = 0\right)$ , поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а следовательно, электроэнергия из первичной цепи не будет передаваться во вторичную, кроме того, значительно возрастает ток в первичной обмотке из-за отсутствия индуктивного сопротивления.

Баланс намагничивающих сил  $F$ ,  $A \cdot \text{виток}$ , в трансформаторе:

$$I_0 w_1 = I_1 w_1 - I_2 w_2;$$

$$F_0 = F_1 - F_2.$$

### Исследование однофазного трансформатора

Для исследования однофазного трансформатора выполняют три опыта:

- опыт холостого хода: снимаются характеристики холостого хода;
- опыт короткого замыкания: снимаются характеристики короткого замыкания;
- опыт под нагрузкой: снимается внешняя характеристика.

#### Опыт холостого хода

*Опыт холостого хода* — это такой режим работы трансформатора, при котором к первичной обмотке подведено напряжение, а вторичная обмотка разомкнута (рис. 3.2), при этом  $Z_{\text{НАГР}} = \infty$ ,  $I_2 = 0$ .

В опыте ХХ по показаниям контрольно-измерительных приборов снимаются три характеристики, при изменении напряжения  $U_1$  от  $0 \dots 1,15 U_{1\text{Н}}$ :

$$I_1 = I_{\text{ХХ}} = f(U_1); \quad \Delta P_{\text{ХХ}} = f(U_1); \quad \cos \varphi_{\text{ХХ}} = f(U_1),$$

где  $I_{\text{ХХ}}$  — это ток, который потребляет трансформатор ( $1 \dots 10\%$ )  $I_{\text{Н}}$ ;

$\Delta P_{\text{ХХ}}$  — потери в режиме холостого хода (потери в стали);  
 $\cos \varphi_{\text{ХХ}}$  — коэффициент мощности трансформатора в режиме холостого хода:

$$\cos \varphi_{\text{ХХ}} = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{U_1 I_1}.$$

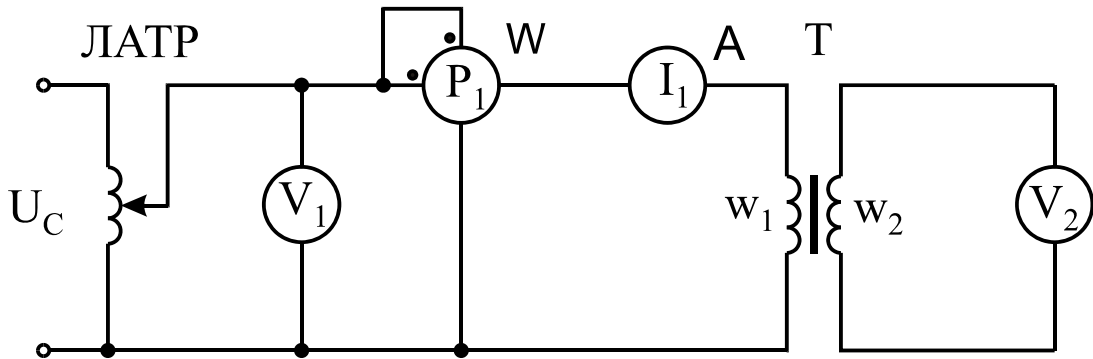


Рис. 3.2. Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода

На основании измеренных данных строятся характеристики трансформатора в режиме холостого хода (рис. 3.3).

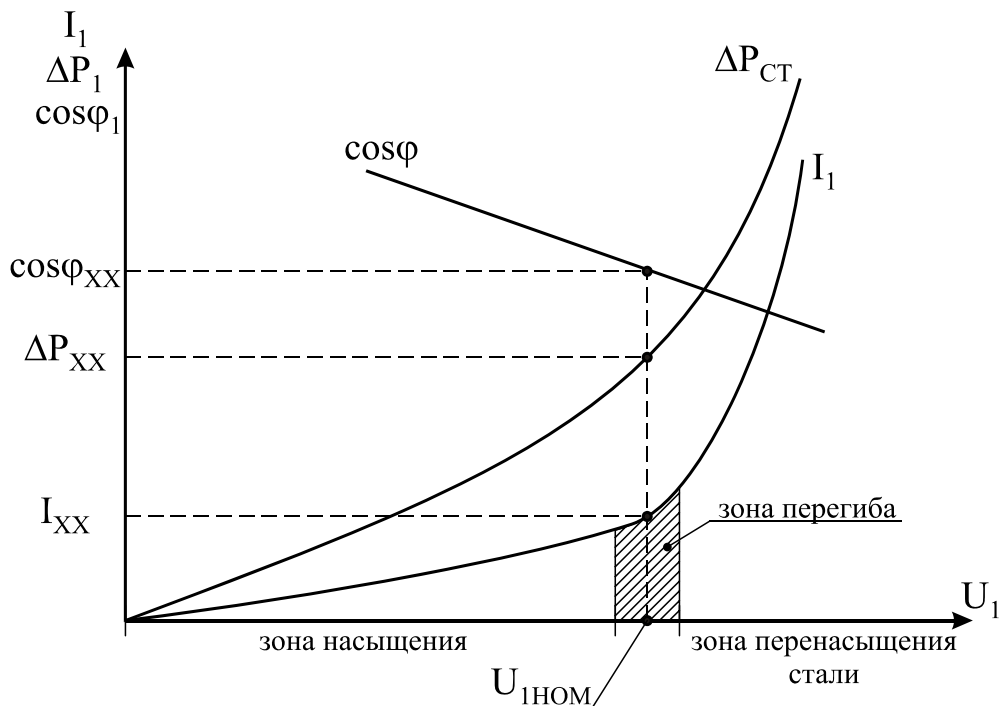


Рис. 3.3. Характеристики опыта холостого хода трансформатора

При изменении напряжения  $U_1$  ток  $I_1$  до зоны перегиба изменяется пропорционально  $U_1$ , а затем резко возрастает. По зоне перегиба характеристики определяется номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1НОМ}$ , значение которого регламентируется нормативными документами (6, 12, 24, 36, 48, 110, 127, 220, 380, 660 В).

### Опыт короткого замыкания

*Опыт короткого замыкания* — это такой режим работы трансформатора, когда вторичная обмотка замкнута накоротко (рис. 3.4), а к первичной подводят такое напряжение, чтобы по обмоткам текли номинальные токи, при этом  $Z_{НАГР} = 0, U_2 = 0$ .

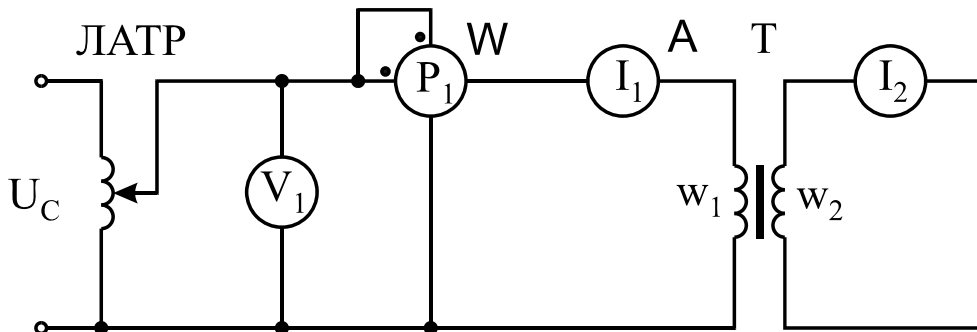


Рис. 3.4. Схема исследования трансформатора в режиме короткого замыкания

В условиях эксплуатации, когда к трансформатору подведено номинальное напряжение  $U_{1НОМ}$ , короткое замыкание является аварийным режимом и представляет большую опасность для трансформатора.

Напряжение, приложенное к первичной обмотке, называют напряжением короткого замыкания, обычно выражают его в % от номинального напряжения:

$$U_{КЗ} = 4,5...10\%U_{1НОМ}; U_{КЗ\%} = \frac{U_{КЗ}}{U_{1НОМ}}100 = 1...10\%.$$

В опыте КЗ снимаются аналогичные опыту ХХ характеристики при изменении напряжения  $U_1$  от  $0...U_{КЗ}$ :

$$I_1 = I_{1НОМ} = I_{1КЗ} = f(U_1); \Delta P_{КЗ} = f(U_1); \cos \varphi_{КЗ} = f(U_1),$$

где  $I_{1КЗ}$  — ток короткого замыкания в первичной обмотке трансформатора;

$\Delta P_{КЗ}$  — потери в режиме короткого замыкания (потери в меди);  
 $\cos \varphi_{КЗ}$  — коэффициент мощности трансформатора при коротком замыкании.

На основании полученных данных строятся характеристики трансформатора в режиме короткого замыкания.

Зная  $U_{КЗ}$ , определяют реальные токи короткого замыкания, необходимые для выбора аппаратов защиты:

$$I_{1КЗ} = \frac{100}{U_{КЗ}} I_{1НОМ} = 20...25 I_{НОМ}; \quad I_{2КЗ} = \frac{100}{U_{КЗ}} I_{2НОМ}.$$

### Внешняя характеристика трансформатора

Опыт под нагрузкой проводится для определения зависимости вторичного напряжения  $U_2$  трансформатора от нагрузки  $I_2$  (рис. 3.5).

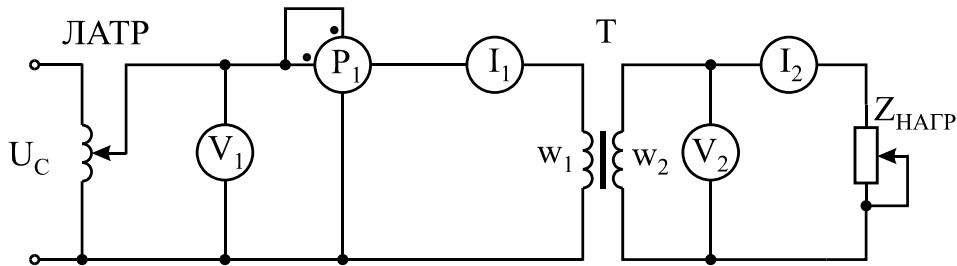


Рис. 3.5. Схема исследования трансформатора в режиме нагрузки

По результатам опыта строится внешняя характеристика:

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } U_1 = U_{1НОМ}; \quad f_1 = f_{1НОМ}; \quad \cos \varphi = const.$$

В зависимости от характера нагрузки напряжение на вторичной обмотке может быть больше либо меньше номинального (рис. 3.6):

$$U_2 = E_2 - \Delta U_2 = E_2 - I_2 Z_2.$$

На основании полученных данных строится характеристика трансформатора в режиме нагрузки.

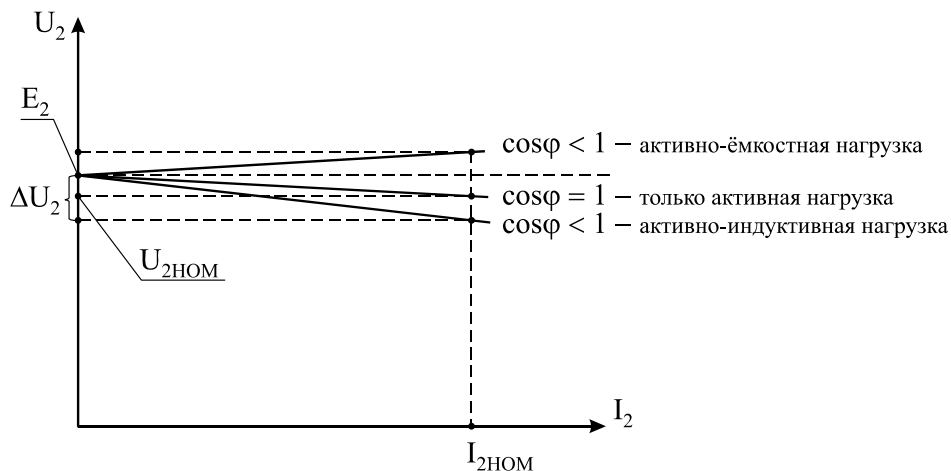


Рис. 3.6. Внешняя характеристика трансформатора

Из данного опыта при полностью активной нагрузке определяются номинальные токи трансформатора.

## Порядок выполнения работы

### Опыт холостого хода

1. Собрать схему для проведения опыта (рис. 3.2).
2. Плавно увеличивая напряжения  $U_1$  от  $0 \dots 1,15U_{1н}$ , записать показания приборов для 8-10 контрольных точек измерения, например: 50, 100, 150, 180, 200, 210, 220, 230, 240, 250 В.
3. Опытные и расчетные данные занести в таблицу 3.1 и построить характеристики холостого хода трансформатора.

Таблица 3.1. Данные режима холостого хода

Опытные данные				Расчётные данные	
$U_1, В$	$I_1, А$	$\Delta P_{ХХ}, Вт$	$U_2, В$	$S, ВА$	$\cos \phi_{ХХ}$

4. По характеристикам определить номинальное напряжение трансформатора исходя из стандартного номинального ряда напряжений и рассчитать коэффициент трансформации.

### Внешняя характеристика трансформатора

1. Собрать схему для проведения опыта (рис. 3.5).
2. Подать на трансформатор номинальное напряжение без введённой нагрузки во вторичной цепи.
3. Посредством изменения сопротивления нагрузки плавно увеличить ток во вторичной обмотке трансформатора до номинального значения, при этом записать показания приборов для 4-6 контрольных точек измерения. Напряжение первичной обмотки поддерживать равным стандартному номинальному напряжению.
4. Опытные данные занести в таблицу 3.2 и построить внешнюю характеристику трансформатора.

Таблица 3.2. Данные режима трансформатора под нагрузкой

$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$

5. Определить характер нагрузки. Чему будет равен  $\cos \phi$  нагрузки?

### Опыт короткого замыкания

1. Собрать схему для проведения опыта (рис. 3.4).
2. Вычислить номинальные токи на первичной и вторичной стороне трансформатора, используя паспортные данные.
3. Плавно увеличивая напряжение  $U_1$  добиться протекания номинальных токов по обмоткам, записать показания приборов для 8-10 контрольных точек измерения.

4. Опытные и расчётные данные занести в таблицу 3.3 и построить характеристики короткого замыкания трансформатора.

Таблица 3.3. Данные режима короткого замыкания

Опытные данные			Расчётные данные		
$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$\Delta P_{\text{КЗ}}, \text{Вт}$	$I_2, \text{А}$	$S, \text{ВА}$	$\cos \varphi_{\text{КЗ}}$

5. Вычислить напряжение короткого замыкания в процентах от номинального.

6. Вычислить реальные токи короткого замыкания трансформатора.

### Содержание отчёта

1. Схемы проведения опытов.
2. Необходимые формулы для вычисления расчётных параметров.
3. Результаты опытов в виде таблиц 3.1-3.3.
4. Построенные зависимости в различных режимах работы трансформатора.

### Контрольные вопросы

1. Объясните назначение обмоток и магнитопровода в трансформаторе.
2. Объясните работу трансформатора.
3. От чего зависит ЭДС обмоток трансформатора?
4. Как рассчитать ЭДС обмоток трансформатора?
5. Как влияет характер нагрузки трансформатора на вторичное напряжение?
6. Почему при увеличении тока  $I_2$  увеличивается пропорционально ток  $I_1$ ?
7. Как вычислить коэффициент трансформации трансформатора?
8. Назовите паспортные и бирочные данные одно- и трёхфазного трансформатора.
9. Что такое напряжение короткого замыкания и как его можно определить?
10. Как вычислить  $\cos \varphi$  в режиме нагрузки?
11. Чем опасен режим короткого замыкания при номинальном напряжении на первичной обмотке трансформатора?
12. Назовите условия построения характеристик в опытах ХХ и КЗ.
13. Назовите условия снятия внешней характеристики трансформатора.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 Т-ОБРАЗНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

*Цель работы:* изучить методику расчёта сопротивлений Т-образной схемы замещения трансформатора.

### Основные теоретические сведения

Сопротивления трансформаторов необходимы для расчёта токов короткого замыкания и последующего выбора уставок аппаратов защиты в схемах электроснабжения. В случае отсутствия паспортных и справочных данных сопротивления трансформатора находят на основании данных опытов короткого замыкания и холостого хода. Чаще всего при расчёте трансформатор представляется Т-образной схемой замещения одной фазы (рис. 4.1), включающей в себя сопротивления:

- первичной цепи:  $R_1, X_1, Z_1$ ;
- вторичной цепи:  $R_2, X_2, Z_2$ ;
- цепи намагничивания:  $R_\mu, X_\mu, Z_\mu$ .

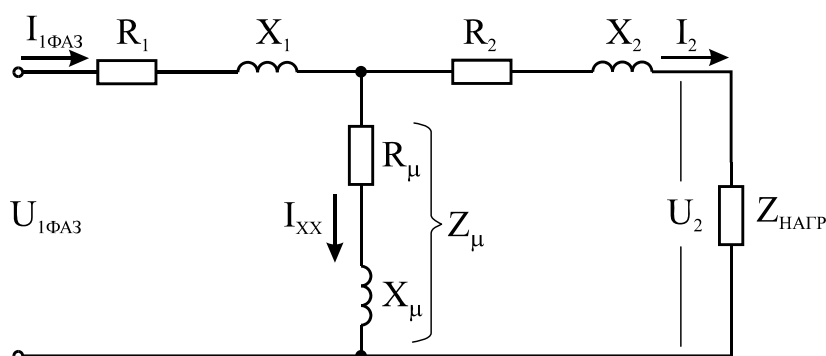


Рис. 4.1. Т-образная схема замещения одной фазы трансформатора

Из опытов холостого хода и короткого замыкания известны следующие данные опытов:

- холостого хода:  $U_{1НОМ}, U_{2НОМ}, \Delta P_{ХХ}, I_{1ХХ}, K_{ТР}$ ;
- короткого замыкания:  $U_{КЗ}, \Delta P_{КЗ}$ ;
- под нагрузкой:  $I_{1НОМ}, I_{2НОМ}$ .

### Опыт холостого хода

При расчёте сопротивления трансформатора в режиме холостого хода принимаются следующие допущения:

$$R_\mu \gg R_1; \quad X_\mu \gg X_1; \quad Z_\mu \gg Z_1,$$

т.е. потерями напряжения из-за малого тока  $I_{XX}$  и малых сопротивлений  $R_1, X_1, Z_1$ , в первичной обмотке в данной схеме (рис. 4.2) можно пренебречь, как и самой обмоткой.

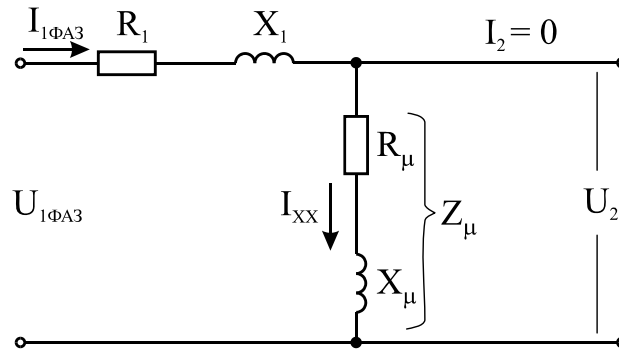


Рис. 4.2. Схема замещения одной фазы трансформатора в режиме ХХ

Тогда расчёт оставшихся сопротивлений цепи намагничивания производится по следующим формулам:

$$Z_{\mu} = \frac{U_{1\Phi A3}}{I_{1XX}}; \quad \Delta P_{XX} = I_{XX}^2 R_{\mu} \Rightarrow R_{\mu} = \frac{\Delta P_{XX}}{I_{XX}^2}; \quad X_{\mu} = \sqrt{Z_{\mu}^2 - R_{\mu}^2}.$$

### Опыт короткого замыкания

В режиме короткого замыкания ввиду малых токов  $I_{\mu}$  цепь намагничивания трансформатора в расчётах обычно не учитывают, в этом случае схема замещения выглядит, как показано на рис. 4.3.

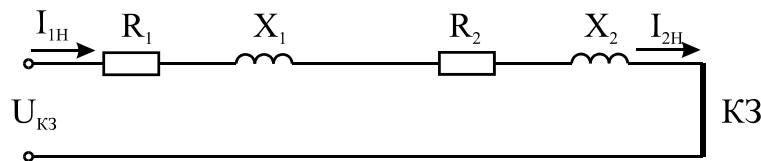


Рис. 4.3. Схема замещения одной фазы трансформатора в режиме КЗ

При расчёте сопротивлений трансформатора в режиме КЗ принимаются следующие допущения:

- 1)  $I_{\mu} \ll I_1$ ;
- 2) трансформатор считается приведённым — это трансформатор, у которого все вторичные параметры равны всем первичным:

$$I'_2 = I_1; \quad R'_2 = R_1; \quad X'_2 = X_1.$$

Учитывая допущения схема замещения значительно упрощается (рис. 4.4).

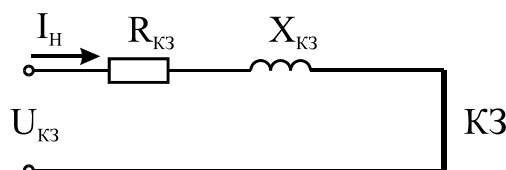


Рис. 4.4. Упрощённая схема замещения одной фазы трансформатора в режиме КЗ



Расчёт сопротивлений Т-образной схемы замещения трансформатора производят по следующим формулам:

$$Z_{K3} = \frac{U_{K3}}{I_{K3}}; \quad R_{K3} = \frac{\Delta P_{K3}}{I_{K3}^2}; \quad X_{K3} = \sqrt{Z_{K3}^2 - R_{K3}^2};$$

$$R_{K3} = R_1 + R_2' = 2R_1 = 2R_2'; \quad X_{K3} = X_1 + X_2' = 2X_1 = 2X_2';$$

$$R_1 = R_{K3} / 2; \quad X_1 = X_{K3} / 2;$$

$$\Delta P_1 = I_1^2 R_1; \quad \Delta P_2 = I_2^2 R_2; \quad \Delta P_1 = \Delta P_2; \quad I_1^2 R_1 = I_2^2 R_2;$$

$$R_2 = \frac{I_1^2 R_1}{I_2^2} = \frac{1}{K_{TP}^2} R_1 = \frac{R_1}{K_{TP}^2}; \quad X_2 = \frac{X_1}{K_{TP}^2}; \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}.$$

### *Порядок выполнения работы*

1. Основываясь на опытах холостого хода и короткого замыкания, произвести расчёт сопротивлений Т-образной схемы замещения трансформатора. Расчётные данные занести в таблицу 4.1.

*Таблица 4.1. Параметры Т-образной схемы замещения трансформатора*

$R_1, \text{ Ом}$	$X_1, \text{ Ом}$	$Z_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$X_2, \text{ Ом}$	$Z_2, \text{ Ом}$	$R_{\Sigma}, \text{ Ом}$	$X_{\Sigma}, \text{ Ом}$	$Z_{\Sigma}, \text{ Ом}$

2. Произвести расчёт тока короткого замыкания на стороне низшего напряжения трансформатора через сопротивления схемы замещения.

### *Содержание отчёта*

1. Т-образная схема замещения трансформатора.
2. Основные расчётные формулы сопротивлений и допущения при расчёте.
3. Итоговая таблица по расчёту параметров схемы замещения.

### *Контрольные вопросы*

1. Для чего необходимо знать сопротивления трансформатора?
2. Какие данные необходимы для расчёта сопротивлений схемы замещения?
3. Что означает приведённый трансформатор?
4. Какие допущения принимаются при расчётах?
5. Поясните методику расчёта сопротивлений схемы замещения.
6. Что такое напряжение короткого замыкания?
7. Как связаны между собой токи и напряжения обмоток высшего и низшего напряжений трансформатора?
8. Как связаны между собой сопротивления обмоток высшего и низшего напряжений трансформатора?
9. Зарисуйте Т-образную схему замещения трансформатора.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММЫ ТРАНСФОРМАТОРА

*Цель работы:* изучить составляющие потерь мощности трансформатора и разобраться с методикой построения векторной диаграммы трансформатора.

### *Основные теоретические сведения*

Потери мощности, полезная мощность и КПД

В процессе трансформирования электрической энергии часть энергии теряется в трансформаторе на покрытие потерь. Потери в трансформаторе разделяются на электрические и магнитные.

*Электрические потери* (потери в меди, потери в обмотках, переменные потери) обусловлены нагревом обмоток трансформаторов при прохождении по этим обмоткам электрического тока. Мощность электрических потерь  $P_{\text{э}}$  пропорциональна квадрату тока и определяется суммой электрических потерь в первичной  $P_{1\text{э}}$  и во вторичной  $P_{2\text{э}}$  обмотках:

$$P_{\text{э}} = P_{1\text{э}} + P_{2\text{э}} = mI_1^2 R_1 + mI_2^2 R_2,$$

где  $m$  — число фаз в обмотках трансформатора (для однофазного трансформатора  $m = 1$ , для трехфазного  $m = 3$ ).

Для изготовленного трансформатора электрические потери определяют опытным путём, измерив мощность короткого замыкания:

$$P_{\text{э}} = \beta^2 P_{\text{кз}},$$

где  $\beta$  — коэффициент нагрузки (загрузки трансформатора):

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}}.$$

Электрические потери называют переменными, т.к. их величина зависит от нагрузки трансформатора.

*Магнитные потери* (потери в стали, потери в магнитопроводе, постоянные потери) происходят в магнитопроводе трансформатора. Причина этих потерь — систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Это перемагничивание вызывает в магнитопроводе два вида магнитных потерь: потери от гистерезиса  $P_{\text{Г}}$ , связанные с затратой энергии на уничтожение остаточного магнетизма в ферромагнитном материале магнитопровода, и потери от вихревых токов  $P_{\text{ВТ}}$ , наводимых переменным магнитным полем в пластинах магнитопровода:

$$P_{\text{М}} = P_{\text{Г}} + P_{\text{ВТ}}.$$

При неизменном первичном напряжении ( $U_1 = const$ ) магнитные потери постоянны, т.е. не зависят от нагрузки трансформатора.

Для изготовленного трансформатора магнитные потери определяют опытным путём, посредством измерения мощности холостого хода при номинальном первичном напряжении.

Таким образом, активная мощность  $P_1$ , поступающая из сети в первичную обмотку трансформатора, частично расходуется на электрические потери в этой обмотке  $P_{1Э}$ . Переменный магнитный поток вызывает в магнитопроводе трансформатора магнитные потери  $P_M$ . Оставшаяся после этого мощность, называемая электромагнитной мощностью  $P_{ЭМ}$ , передаётся во вторичную обмотку, где частично расходуется на электрические потери в этой обмотке  $P_{2Э}$ :

$$P_{ЭМ} = P_1 - P_{1Э} - P_M.$$

Активная мощность, поступающая в нагрузку трансформатора:

$$P_2 = P_1 - \sum P,$$

где  $\sum P$  — суммарные потери в трансформаторе:

$$\sum P = P_{1Э} + P_M + P_{2Э}.$$

Все виды потерь, сопровождающие рабочий процесс трансформатора, представляются в виде энергетической диаграммы (рис. 5.1).

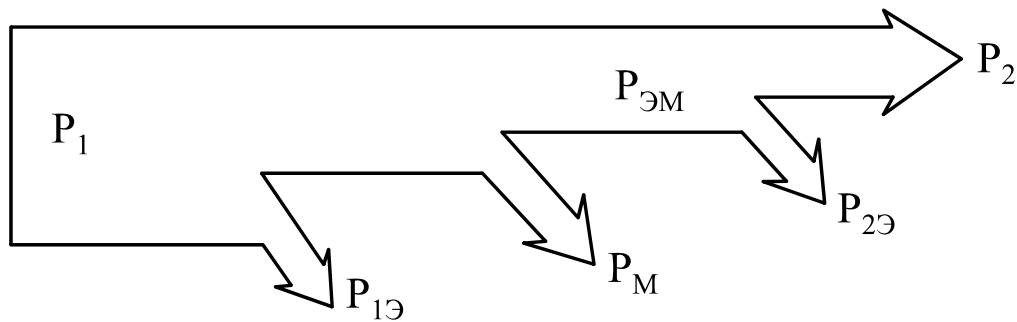


Рис. 5.1. Энергетическая диаграмма трансформатора

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора определяется как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки  $P_2$  (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки  $P_1$  (подводимая мощность):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}.$$

Сумма потерь:  $\sum P = P_{xx} + \beta^2 P_{кз}.$

Активная мощность на выходе вторичной обмотки трёхфазного трансформатора:

$$P_2 = \sqrt{3}U_{2НОМ}I_{2НОМ}.$$

где  $I_2, U_2$  — линейные значения тока и напряжения;

$S_{НОМ}$  — номинальная мощность трансформатора:

$$S_{НОМ} = \sqrt{3}U_{2НОМ}I_{2НОМ}.$$

Учитывая, что  $P_1 = P_2 + \sum P$ , получаем выражения для расчёта КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2}{\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 + P_{XX} + \beta^2 P_{КЗ}}.$$

Из последнего выражения видно, что КПД трансформатора зависит как от величины  $\beta$  так и от характера нагрузки ( $\cos \varphi$ ). Причём даже при малых значениях  $\beta$  КПД трансформатора уже высокий (рис. 5.2).

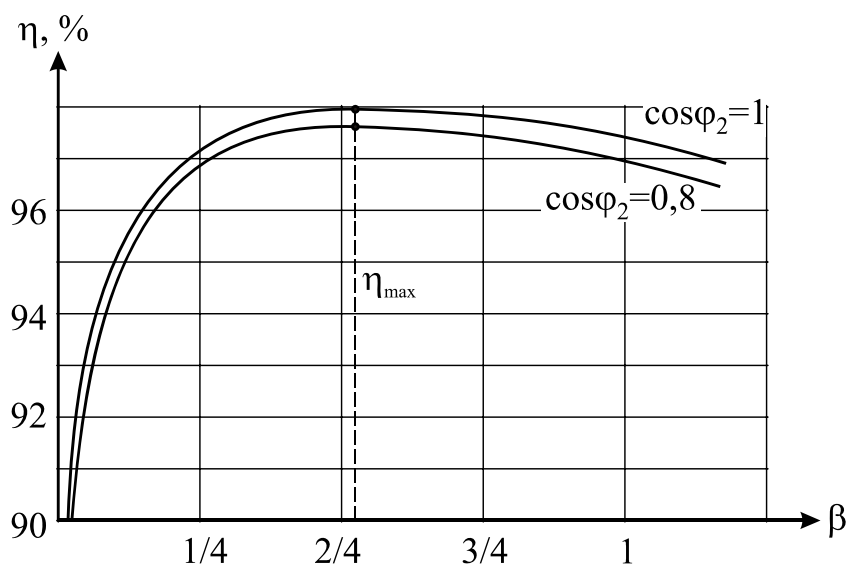


Рис 5.2. График зависимости КПД трансформатора от нагрузки

Кроме КПД по мощности пользуются понятием КПД по энергии, который представляет собой отношение количества энергии, отданной трансформатором потребителю  $W_2$ , кВт·ч, в течение года, к энергии  $W_1$ , полученной им от питающей электросети за это же время:

$$\eta_э = \frac{W_2}{W_1}.$$

КПД по энергии характеризует эффективность эксплуатации трансформатора.

Благодаря отсутствию в трансформаторе вращающихся частей его КПД выше, чем у электрических машин. В трансформаторах большой мощности КПД достигает 98...99%

### Векторная диаграмма трансформатора

Векторная диаграмма (рис. 5.3) строится исходя из уравнений ЭДС и токов приведенного трансформатора:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \Delta \underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{R}_1 + \underline{I}_1 \underline{X}_1;$$

$$\underline{U}'_2 = -\underline{E}'_2 + \Delta \underline{U}'_2 = -\underline{E}'_2 + \underline{I}'_2 \underline{Z}'_2 = -\underline{E}'_2 + \underline{I}'_2 \underline{R}'_2 + \underline{I}'_2 \underline{X}'_2;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2).$$

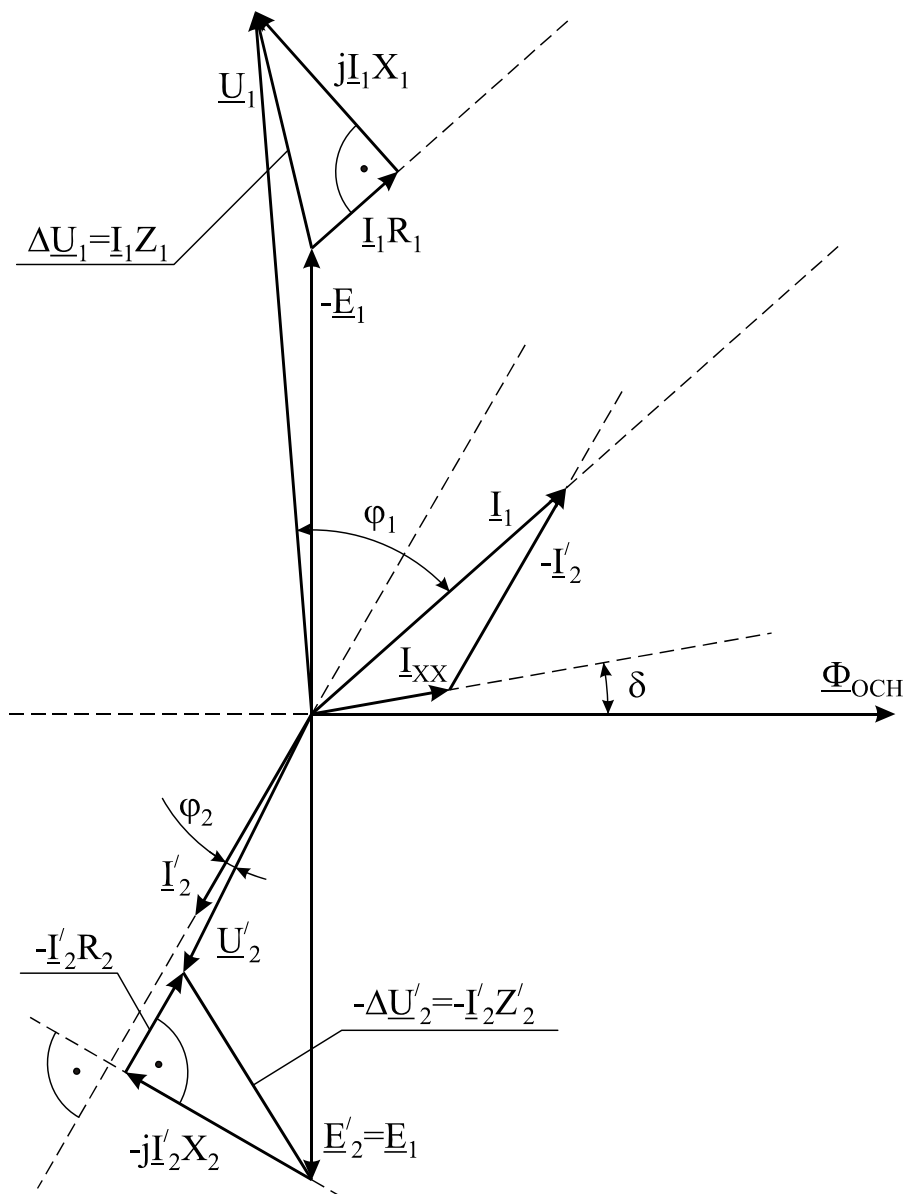


Рис. 5.3. Векторная диаграмма токов и напряжений трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Векторная диаграмма — это графическое выражение основных уравнений приведённого трансформатора, она наглядно показывает соотношения и фазовые сдвиги между токами, ЭДС и напряжениями трансформатора.

### *Порядок выполнения работы*

1. Основываясь на опытных данных при снятии внешней характеристики трансформатора, рассчитать коэффициент загрузки трансформатора и его КПД, расчётные данные занести в таблицу 5.1.

*Таблица 1. Исходные данные  
для построения зависимости  $\eta = f(\beta)$*

$\beta$	$\eta$

Используя расчётные данные построить зависимость

$$\eta = f(\beta).$$

2. Построить векторную диаграмму для активно-ёмкостной нагрузки трансформатора.

### *Содержание отчёта*

1. Энергетическая диаграмма и основные формулы определения составляющих потерь трансформатора.
2. График зависимости КПД трансформатора от его загрузки.
3. Векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивной и активно-ёмкостной нагрузке.

### *Контрольные вопросы*

1. Из каких составляющих состоят потери мощности трансформатора?
2. Чем обусловлены электрические потери трансформатора, как их можно уменьшить?
3. Чем обусловлены магнитные потери трансформатора, как их можно уменьшить?
4. Что такое коэффициент загрузки трансформатора?
5. Как найти электрические потери в трансформаторе?
6. Как найти магнитные потери в трансформаторе?

7. Что такое показывает КПД трансформатора, как его рассчитать?
8. Что такое энергетический КПД трансформатора, как его рассчитать?
9. Что показывает энергетическая диаграмма активных мощностей?
10. Объясните порядок построения векторной диаграммы трансформатора.
11. От чего зависят углы  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и как их можно вычислить?
12. Что показывает угол  $\delta$ ?
13. Поясните связь Т-образной схемы замещения трансформатора с векторной диаграммой.

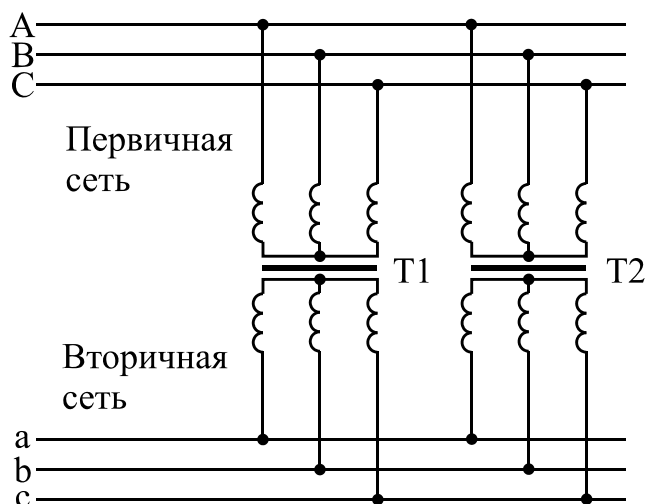
## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6 ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

*Цель работы:* изучить условия включения трансформаторов на параллельную работу и основные способы регулирования вторичного напряжения трансформатора.

### *Основные теоретические сведения*

#### Параллельная работа трансформаторов

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети (рис. 6.1).



*Рис. 6.1. Включение трансформаторов на параллельную работу*

Применение нескольких параллельно включенных трансформаторов вместо одного трансформатора суммарной мощности необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения в случае аварии в каком-либо трансформаторе или отключения его для ремонта. Это также целесообразно при работе трансформаторной подстанции с переменным графиком нагрузки, например, когда мощность нагрузки значительно меняется в различные часы суток. В этом случае при уменьшении мощности нагрузки можно отключить один или несколько трансформаторов для того, чтобы нагрузка трансформаторов, оставшихся включенными, была близка к номинальной. В итоге эксплуатационные показатели работы трансформаторов (КПД и  $\cos \varphi_2$ ) будут достаточно высокими.



Для того чтобы нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, допускается параллельная работа двухобмоточных трехфазных трансформаторов при следующих условиях:

- 1) равенство номинальных напряжений трансформаторов;
- 2) одинаковая группа соединения обмоток;
- 3) равенство напряжений короткого замыкания;
- 4) трансформаторы должны быть сфазированны.

*1. Трансформаторы должны иметь одинаковый коэффициент трансформации при одинаковых номинальных напряжениях.* При несоблюдении этого условия даже в режиме холостого хода, между параллельно включенными трансформаторами возникает уравнивающий ток, обусловленный разностью вторичных напряжений трансформаторов:

$$I_{ур} = \frac{\Delta U}{Z_{T1} + Z_{T2}},$$

где  $Z_{T1}, Z_{T2}$  — внутренние сопротивления трансформаторов.

При нагрузке трансформаторов уравнивающий ток накладывается на нагрузочный. При этом трансформатор с более высоким вторичным напряжением ХХ (с меньшим коэффициентом трансформации) оказывается перегруженным, а трансформатор равной мощности, но с большим коэффициентом трансформации, недогруженным. Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то приходится снижать общую нагрузку. При значительной разнице коэффициентов трансформации нормальная работа трансформаторов становится практически невозможной. Однако ГОСТ допускает включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если разница коэффициентов трансформации не превышает  $\pm 0,5\%$  их среднего значения:

$$\Delta K_{TP} = \frac{K_{TP1} - K_{TP2}}{K_{TPC}} 100\% \leq 0,5\%,$$

где  $K_{TPC}$  — среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации:

$$K_{TPC} = \sqrt{K_{TP1} K_{TP2}}.$$

2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения. При несоблюдении этого условия вторичные линейные напряжения трансформаторов окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга и в цепи трансформаторов появится разностное напряжение  $\Delta U$ , под действием которого возникнет значительный уравнительный ток, в 15-20 раз превышающий номинальный ток нагрузки, т.е. возникнет аварийная ситуация.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения КЗ. Соблюдение этого условия необходимо для того, чтобы общая нагрузка распределялась между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. С некоторым приближением, пренебрегая токами ХХ, можно параллельно включенные трансформаторы заменить их сопротивлениями КЗ,  $Z_{K31}$  и  $Z_{K32}$  и тогда от схемы, показанной на (рис. 6.2, а), можно перейти к эквивалентной схеме (рис. 6.2, б).

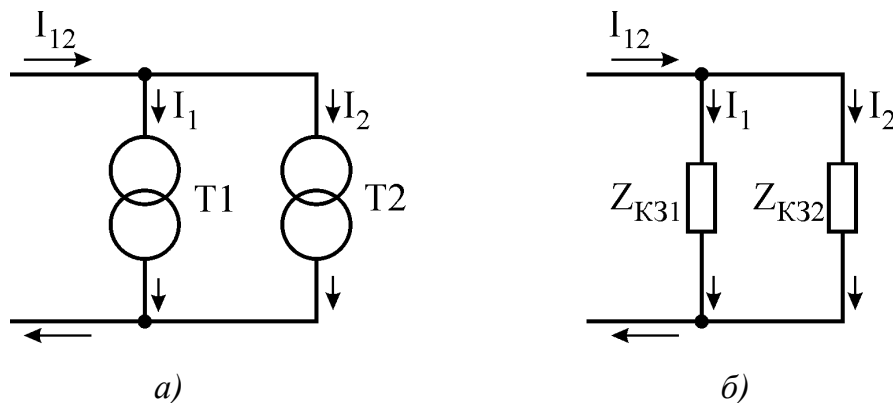


Рис. 6.2. Распределение токов при параллельной работе трансформаторов: а — схема соединения; б — схема замещения

Известно, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_{K32}}{Z_{K31}}.$$

Преобразовав выражение, получим:

$$\frac{S_1}{S_{1НОМ}} \frac{S_{2НОМ}}{S_2} = \frac{U_{K31}}{U_{K32}},$$

где  $S_1, S_2$  — фактическая нагрузка трансформаторов;  
 $S_{1НОМ}, S_{2НОМ}$  — номинальные мощности трансформаторов;  
 $U_{K31}, U_{K32}$  — напряжения КЗ трансформаторов.

Из последнего соотношения следует, что относительные мощности (нагрузки) параллельно работающих трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям КЗ. Другими словами, при неравенстве напряжений КЗ параллельно работающих трансформаторов больше нагружается трансформатор с меньшим напряжением КЗ. В итоге это ведёт к перегрузке одного трансформатора (с меньшим  $U_{КЗ}$ ) и недогрузке другого (с большим  $U_{КЗ}$ ). Чтобы не допустить перегрузки трансформатора, необходимо снизить общую нагрузку. Таким образом, неравенство напряжений КЗ не допускает полного использования параллельно работающих трансформаторов по мощности.

Учитывая, что практически не всегда можно подобрать трансформаторы с одинаковыми напряжениями КЗ, стандарт допускает включение трансформаторов на параллельную работу при разнице напряжений КЗ не более чем 10% от их среднего арифметического значения. Разница в напряжениях КЗ трансформаторов тем больше, чем больше эти трансформаторы отличаются друг от друга по мощности. Поэтому рекомендуют, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных параллельно, было не более чем 3:1.

*4. Трансформаторы должны быть сфазированы.* Помимо соблюдения указанных трёх условий, необходимо перед включением трансформаторов на параллельную работу проверить порядок чередования фаз, который должен быть одинаковым у всех трансформаторов.

Соблюдение всех перечисленных условий проверяется фазировкой трансформаторов, сущность которой состоит в том, что одну пару противоположно расположенных зажимов на рубильнике (рис. 6.3) соединяют проводом и вольтметром  $V_0$  (нулевой вольтметр) измеряют напряжение между оставшимися несоединенными парами зажимов рубильника. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра  $V_0$  равны нулю. В этом случае трансформаторы можно подключать на параллельную работу. Если вольтметр  $V_0$  покажет некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено. Необходимо устранить это нарушение и вновь провести фазировку трансформаторов.

Следует отметить, что при нарушении порядка следования фаз вольтметр  $V_0$  покажет двойное линейное напряжение. Это необходимо учитывать при подборе вольтметра, предел измерения которого должен быть не менее двойного линейного напряжения на вторичной стороне трансформаторов.

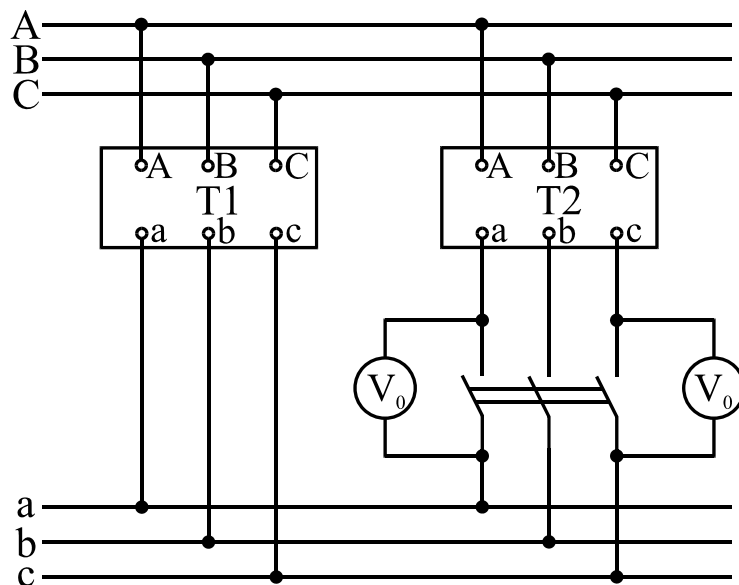


Рис. 6.3. Фазировка трансформаторов

Общая нагрузка всех включенных на параллельную работу трансформаторов  $S_{ОБЩ}$  не должна превышать суммарной номинальной мощности этих трансформаторов:

$$S_{ОБЩ} \leq \sum S_{НОМi}.$$

Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами определяется следующим образом:

$$S_i = S_{ОБЩ} \frac{S_{НОМi}}{U_{КЗi} \sum \frac{S_{НОМi}}{U_{КЗi}}},$$

где  $S_i$  — нагрузка одного из параллельно работающих трансформаторов, кВА;

$S_{ОБЩ}$  — общая нагрузка всей параллельной группы, кВА;

$S_{НОМi}$  — номинальная мощность данного трансформатора, кВА;

$U_{КЗi}$  — напряжение КЗ данного трансформатора, %.

### Способы регулирования вторичного напряжения трансформатора

В соответствии с формулой ЭДС регулировать напряжение на вторичной обмотке трансформатора возможно посредством изменения:

- магнитного потока  $\Phi$ ;
- частотой питающего напряжения  $f$ ;
- числом витков в обмотках  $w_1, w_2$ .

Наиболее предпочтительным является регулирование напряжения в трансформаторе посредством изменения числа витков первичной обмотки. Регулировочные ответвления в трёхфазном трансформаторе делают в каждой фазе либо вблизи нулевой точки, либо посередине обмотки высшего напряжения. В первом случае на каждой фазе делают по три ответвления, при этом среднее ответвление соответствует номинальному коэффициенту трансформации, а два других — коэффициентам трансформации, отличающимся на  $\pm 5\%$ . Во втором случае обмотку разделяют на две части и делают шесть ответвлений. Это даёт возможность кроме номинального коэффициента трансформации получить ещё четыре дополнительных значения, отличающихся от номинального на  $\pm 2,5$  и  $\pm 5\%$ .

В трёхфазном трансформаторе используется два вида устройства для регулирования напряжения:

ПБВ — переключение без возбуждения (без нагрузки);

РПН — регулирование под нагрузкой.

#### *Содержание отчёта*

1. Схема включения трансформаторов на параллельную работу.
2. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.

#### *Контрольные вопросы*

1. Объясните принцип действия трансформатора.
2. Как вычислить коэффициент трансформации трансформатора?
3. Посредством каких параметров возможно регулирование вторичного напряжения на трансформаторе?
4. На какой стороне (ВН или НН) выгоднее регулировать вторичное напряжение?
5. Как осуществляется регулирование напряжения в трансформаторах под нагрузкой?
6. Для чего используется включение трансформаторов на параллельную работу?
7. Назовите четыре условия включения трансформаторов на параллельную работу.
8. Что такое фазировка трансформаторов?
9. Что обозначает группа соединения трансформаторов?
10. От чего зависит напряжение короткого замыкания трансформатора?
11. От чего возникают уравнительные токи и как их вычислить?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

*Цель работы:* изучить основные сведения о специальных трансформаторах и их режимах работы.

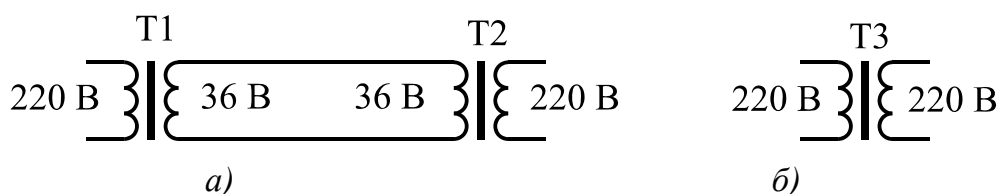
### *Основные теоретические сведения*

Все трансформаторы, кроме силовых, называются специальными. Основными типами специальных трансформаторов являются:

- разделительные трансформаторы;
- измерительные трансформаторы тока;
- измерительные трансформаторы напряжения;
- сварочные трансформаторы;
- выпрямительные трансформаторы;
- автотрансформаторы;
- импульсные трансформаторы.

### Разделительные трансформаторы

Разделительные трансформаторы применяются для разделения электрических цепей с целью обеспечения повышенной электробезопасности. Разделительный трансформатор может быть составлен из двух силовых трансформаторов, один из которых понижает напряжение сети, а второй пропорционально повышает (рис. 7.1, а), что эквивалентно трансформатору, в котором первичная и вторичная обмотки имеют одинаковое количество витков, соответственно на вторичной обмотке наводится напряжение, равное напряжению в первичной обмотке (рис. 7.1, б). Такие трансформаторы устанавливают в помещениях с повышенной влажностью (душевых комнатах).



*Рис. 7.1. Разделительные трансформаторы  
а — эквивалентная схема; б — условно-графическое обозначение*

Разделение электрических цепей позволяет повысить электробезопасность для человека в случае непреднамеренного прикосновения его к токоведущим частям (рис. 7.2).

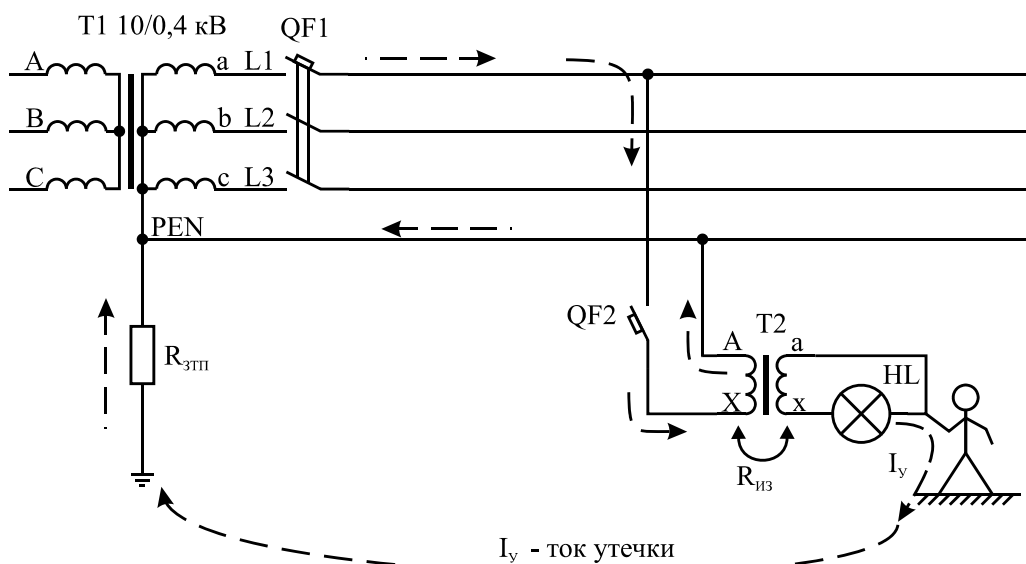


Рис. 7.2. Обеспечение безопасного питания с помощью разделительного трансформатора

В этом случае, за счёт большего сопротивления магнитной цепи, ток, проходящий через тело человека (ток утечки), будет очень мал, что не приведёт к летальному исходу.

### Измерительные трансформаторы тока

Измерительные трансформаторы тока (ТА) служат для пропорционального снижения первичного тока во вторичный и для изоляции вторичных цепей от первичных. Снижение первичного тока необходимо для снижения габаритов измерительных приборов. Все ТА должны иметь маркировку первичных и вторичных цепей. Начало и конец первичной обмотки обозначаются соответственно Л1 и Л2, а вторичной — И1 и И2. В условном обозначении ТА отражается наличие двух обмоток.

В отличие от силовых трансформаторов и трансформаторов напряжения, для трансформаторов тока номинальным является режим короткого замыкания вторичной обмотки, а опасным — режим холостого хода, когда нарушается целостность вторичной цепи. Это обуславливается принципом действия трансформатора тока (рис. 7.3). Ток нагрузки потребителей  $I_1$  протекает по первичной обмотке с числом витков  $w_1$ . Этот ток создает МДС  $I_1 w_1$ . Под действием этой МДС через магнитопровод замыкается магнитный поток  $\Phi_1$ . Магнитный поток  $\Phi_1$  индуцирует во вторичной обмотке с числом витков  $w_2$  ЭДС  $E_2$ .

При замыкании вторичной обмотки на сопротивление во вторичной цепи протекает ток  $I_2$ , этот ток создает свою МДС  $I_2 w_2$  и свой магнитный поток  $\Phi_2$ , который, по правилу Ленца, направлен навстречу потоку  $\Phi_1$ .

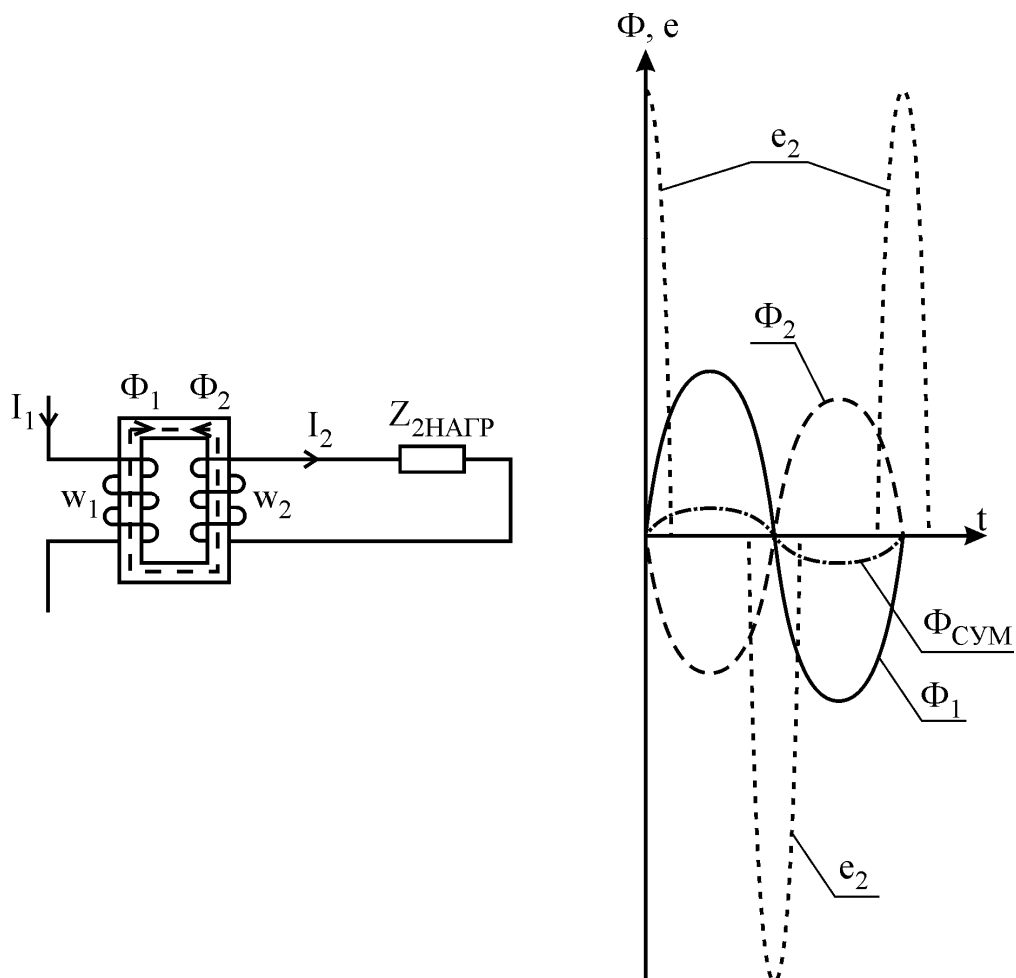


Рис. 7.3. Принцип действия трансформатора тока

Суммарный магнитный поток  $\Phi_{СУМ}$ , проходящий через магнитопровод, равен разности магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ :

$$\Phi_{СУМ} = \Phi_1 - \Phi_2.$$

$\Phi_{СУМ}$ , на который рассчитывается магнитопровод, по величине намного меньше потока  $\Phi_1$ , и амплитуда синусоиды вторичной ЭДС имеет небольшое значение. Соответственно небольшое напряжение будет на нагрузке во вторичной цепи. Так, при  $Z_{2НАГР} = 0,6$  Ом и номинальной нагрузке в первичной цепи:

$$U_{2НОМ} = I_{2НОМ} \cdot Z_{2НАГР} = 5 \cdot 0,6 = 3 \text{ В.}$$

Такое напряжение не представляет опасности для обслуживающего персонала, даже если он прикасается одновременно к двум выводам вторичной цепи трансформатора тока.

Если разрывается вторичная цепь трансформатора тока, когда по первичной цепи протекает номинальный ток — ток потребителей, то исчезает поток, создаваемый вторичной обмоткой  $\Phi_2$ , а через магнито-



провод пытается пройти поток  $\Phi_1$ . Поскольку сечение магнитопровода не рассчитано на пропускание такого большого магнитного потока, то магнитопровод насыщается и нагревается. Внешне это проявляется в почернении магнитопровода из-за обугливания межлистовой изоляции. От магнитопровода нагреваются обмотки, их изоляция обугливается.

Кроме этого, при разрыве вторичной обмотки в месте разрыва появляется высокое напряжение, достигающее по амплитуде нескольких кВ. Это вызывается тем, что в момент перехода магнитного потока  $\Phi_1$  через нулевое значение скорость изменения магнитного потока резко увеличивается по сравнению с  $\Phi_{\text{СУМ}}$ . Тогда на вторичной обмотке наводится ЭДС:

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}.$$

Трансформатор тока превращается в своеобразный пик-трансформатор. ЭДС наводится только в моменты перехода магнитного потока через нулевое значение. Пики ЭДС достигают величины нескольких кВ. Включение человека в цепь разорванной вторичной обмотки приводит к поражению электрическим током.

Соответственно основное назначение измерительного трансформатора тока:

- расширения пределов измерения по току;
- обеспечение электробезопасности обслуживающего персонала при эксплуатации КИП за счёт разделения первичной обмотки и вторичной большим сопротивлением  $R_{\text{ИЗ}}$ .

Большинство щитовых приборов для подстанций и электростанций изготавливаются на номинальный ток 5 А, поэтому и номинальный вторичный ток ТА составляет 5 А. Важной характеристикой ТА является коэффициент трансформации, который показывает отношение первичного тока ко вторичному, например 100/5 (произносят 100 на 5).

### Измерительные трансформаторы напряжения

По принципу действия трансформаторы напряжения (TV) ничем не отличаются от силовых трансформаторов, только специальной конструкцией обеспечивается большая точность в преобразовании первичного напряжения во вторичное. В последнее время трёхфазный TV выполняют в виде трёхфазной группы из трёх однофазных TV, помещенных в один бак с трансформаторным маслом. В эксплуатации находится много пятистержневых TV. Масло обеспечивает изоляцию токоведущих частей от корпуса и охлажде-

ние обмоток за счёт естественной циркуляции масла. Выпускаются также TV с литой изоляцией. Класс точности TV не превышает 0,5 при допустимой нагрузке на вторичной обмотке.

Каждая фаза TV имеет одну первичную обмотку с числом витков  $w_1$  и две вторичных обмотки с числами витков  $w_2$  и  $w_3$ . Соединение обмоток соответственно «звезда с нулем», «звезда с нулем», «разомкнутый треугольник» (рис. 7.4). Нулевая точка первичной обмотки обязательно должна быть заземлена, иначе не будет контролироваться состояние изоляции сети 10 кВ. Вторичная обмотка  $w_2$  имеет номинальное линейное напряжение 100 В и служит для питания цепей напряжения измерительных приборов. Другая вторичная обмотка  $w_3$  является фильтром напряжения нулевой последовательности. В нормальном режиме работы сети на выводах обмотки  $w_3$  наблюдается небольшое напряжение небаланса, а напряжение до 100 В появляется на этих выводах при повреждении изоляции в силовой сети.

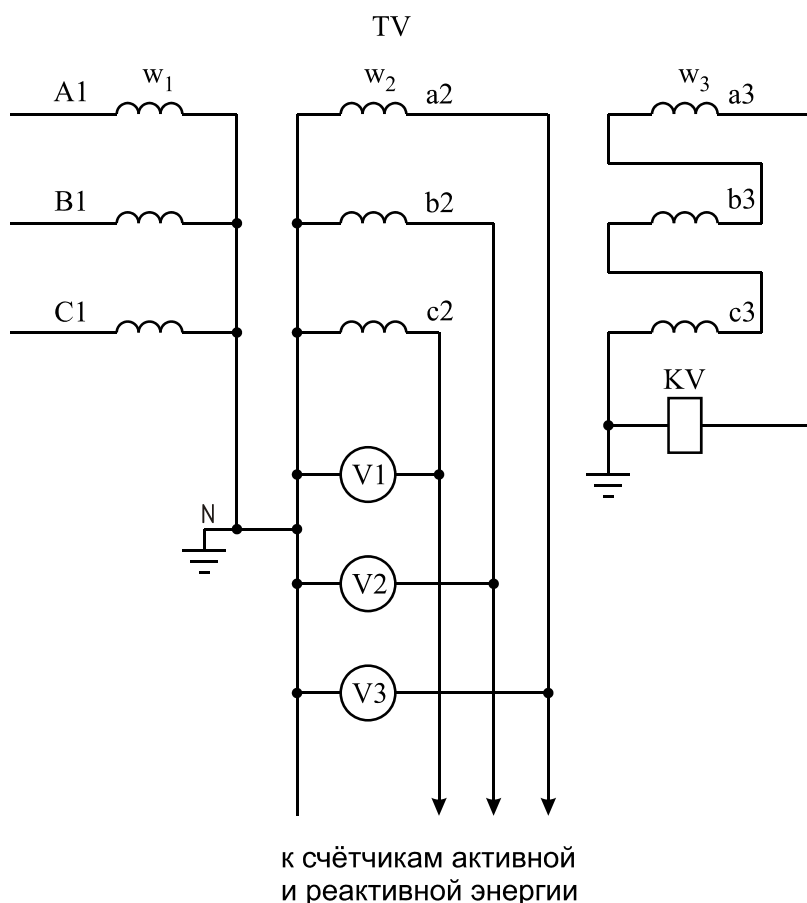


Рис. 7.4. Трансформатор напряжения

Соотношение напряжений на фазах трансформатора:

$$\frac{10000}{\sqrt{3}} : \frac{100}{\sqrt{3}} : \frac{100}{3}$$

Для измерения уровня напряжения на шинах подстанции ко вторичной обмотке  $w_2$  трансформатора напряжения подключается вольтметр.

Трансформаторы напряжения TV устанавливаются на каждой секции распределительного устройства подстанции. Подключение к шинам секции осуществляется через предохранитель и разъединитель. Предохранитель с кварцевым заполнением обеспечивает защиту трансформаторов напряжения от токов КЗ за TV на шинах 100 В и внутри TV.

Выбор TV осуществляется по допустимой нагрузке, чтобы обеспечить необходимый класс точности. Для этого необходимо знать сопротивление или собственное потребление подключаемых приборов и выполнять условие:

$$S_{\text{доп.TV}} \geq S_1 + S_2 + \dots + S_N,$$

где  $S_{\text{доп.TV}}$  — нагрузка, допустимая для принимаемого класса точности;

$S_1, S_2, S_N$  — нагрузка, создаваемая измерительными приборами.

Таким образом, трансформаторы напряжения на подстанции 35/10 кВ устанавливаются на каждой секции 10 кВ.

С помощью TV выполняется:

- измерение уровня фазного и линейного напряжения на шинах;
- сигнализация наличия замыкания на землю в сети 10 кВ;
- определение фазы с поврежденной изоляцией;
- проведение фазировки силовых трансформаторов;
- питание зарядных устройств для запасания энергии с последующим разрядом на отключающие катушки выключателей;
- подключение измерительных органов устройств автоматического включения резерва питания;
- питание цепей напряжения устройств релейной защиты.

Для подключения счетчиков активной энергии и получения трёх линейных напряжений в некоторых случаях используют однофазные TV, включенные на два линейных напряжения. Такая схема подключения называется «открытый треугольник».

### Сварочные трансформаторы

Трансформатор для дуговой электросварки, обычно называемый сварочным трансформатором, представляет собой однофазный двухобмоточный понижающий трансформатор (рис. 7.5), преобразующий напряжение сети 220 или 380 В в напряжение 60...70 В, необходимое для надежного зажигания и устойчивого горения электрической дуги между металлическим электродом и свариваемыми деталями.

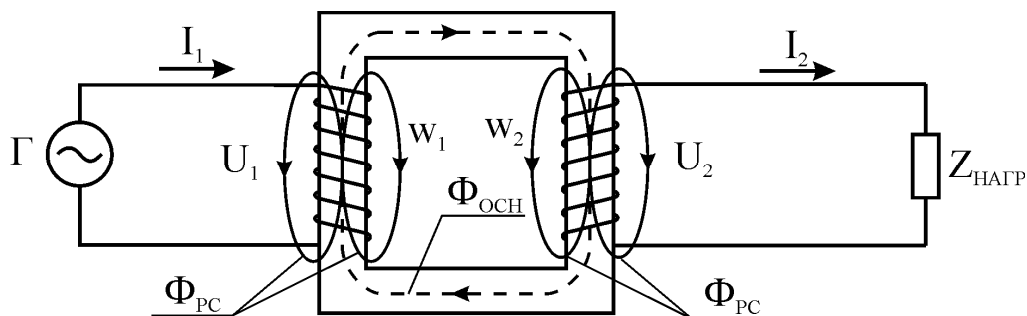


Рис. 7.5. Сварочный трансформатор

Основное требование для сварочных трансформаторов — крутопадающая внешняя характеристика (рис. 7.6), обеспечивающая допустимый ток КЗ, т.к. сварочный трансформатор обеспечивает не только электрическую дугу, но и должен работать в режиме КЗ в момент зажигания дуги. Для того чтобы обеспечить возможность регулировки потока рассеяния, а как следствие — регулирование вторичного тока, конструкция сварочного трансформатора выполняется с возможностью перемещения вторичной обмотки относительно первичной.

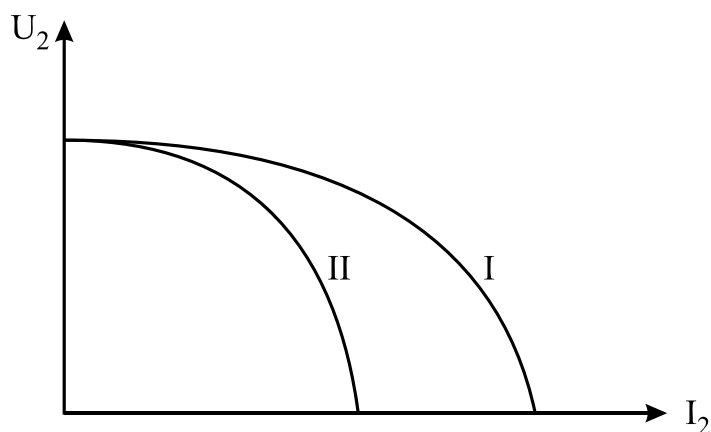


Рис. 7.6. Внешняя характеристика сварочного трансформатора

Другая конструкция сварочного трансформатора предусматривает регулирование вида внешней характеристики внешним устройством, подключенным последовательно в выходную цепь трансформатора (активное сопротивление или дроссель).

В сварочных трансформаторах для более эффективного изменения тока используют изменение коэффициента трансформации: от обмотки делают отпайки и с помощью специального переключающего устройства осуществляют изменение числа витков обмотки (по первичной или вторичной обмотке).

## Выпрямительные трансформаторы

Во вторичные обмотки этих трансформаторов включены вентили — устройства, обладающие односторонней проводимостью (рис. 7.7, а).

Ток во вторичной обмотке этого трансформатора  $i_2$  является пульсирующим, так как он создается только положительными полуволнами вторичного напряжения  $U_2$  (рис. 7.7, б).

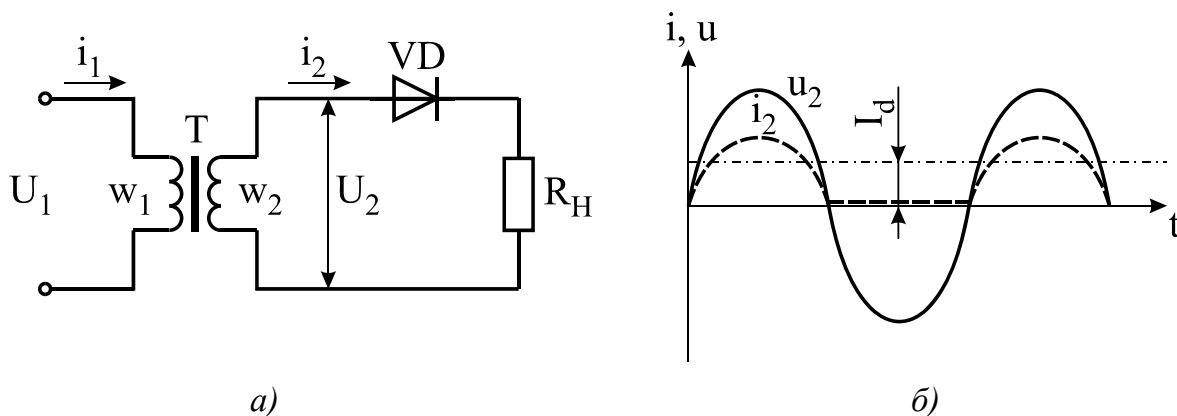


Рис. 7.7. Трансформатор в схеме однофазного однополупериодного выпрямителя тока:

а — схема включения; б — временная диаграмма тока и напряжения

Пульсирующий ток имеет две составляющие:

– постоянную:

$$I_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_2}{R_H};$$

– переменную:

$$I_{\text{ПЕР}} = i_2 - I_d.$$

В связи с тем, что первичный и вторичный токи трансформаторов имеют разные действующие значения (из-за их несинусоидальности), расчётные мощности первичной и вторичной обмоток одного и того же трансформатора неодинаковы ( $S_{1\text{НОМ}} \neq S_{2\text{НОМ}}$ ). Поэтому для оценки мощности трансформатора, работающего в выпрямительной схеме, вводятся понятия:

– типовой мощности:

$$S_T = 0,5(S_{1\text{НОМ}} + S_{2\text{НОМ}}) = 0,5(I_{1\text{НОМ}}U_{1\text{НОМ}} + I_{2\text{НОМ}}U_{2\text{НОМ}});$$

– и коэффициента типовой мощности:

$$K_T = \frac{S_T}{P_{d\text{НОМ}}},$$

где  $P_{d\text{НОМ}}$  — выходная мощность, т.е. мощность, поступающая к потребителю постоянного тока:  $P_{d\text{НОМ}} = U_{d\text{НОМ}} I_{d\text{НОМ}}$ , в номинальном режиме (при номинальных напряжениях  $U_{d\text{НОМ}}$  и токе  $I_{d\text{НОМ}}$ .

Типовая мощность трансформатора всегда больше его выходной мощности, т.е.  $K_T > 1$ . Объясняется это тем, что при любой схеме выпрямления  $U_2 > U_d$  и  $I_2 > I_d$ .

Из этого следует, что габариты и вес трансформаторов для выпрямителей всегда больше, чем у трансформаторов такой же выходной мощности, но при синусоидальных токах в обмотках. Это объясняется тем, что в трансформаторах, работающих в выпрямительных схемах, полезная мощность определяется постоянной составляющей вторичного тока  $I_d$ , а нагрев обмоток — полным вторичным  $I_2$  и первичным  $I_1$  токами, содержащими высшие гармонические.

При выборе трансформатора для выпрямительной установки или же при его проектировании необходимо знать значение коэффициента типовой мощности  $K_T$ .

Значение переменного напряжения на выходе вторичной обмотки трансформатора, необходимого для получения заданного номинального значения постоянного напряжения  $U_{d\text{НОМ}}$ , определяется выражением:

$$U_{2\text{НОМ}} = K_U U_{d\text{НОМ}},$$

где  $K_U$  — коэффициент напряжения.

Значения коэффициентов напряжения  $K_U$  и типовой мощности  $K_T$  для некоторых схем выпрямления представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Значения коэффициентов напряжения и типовой мощности

Схема выпрямления	$K_U$	$K_T$
Однофазная однополупериодная	2,22	3,09
Однофазная двухполупериодная мостовая	1,11	1,23
Однофазная двухполупериодная с нулевым выводом	1,11	1,48
Трёхфазная с нулевым выводом	0,855	1,345
Трёхфазная мостовая	0,427	1,05

## Автотрансформаторы

Автотрансформатор — это такой вид трансформатора, в котором помимо магнитной связи между обмотками имеется еще и электрическая связь.

Автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает следующими преимуществами:

- меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь);
- более высоким КПД;
- меньшими размерами и стоимостью.

Широко распространены автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации. В этом случае автотрансформатор снабжают устройством, позволяющим регулировать значение вторичного напряжения путём изменения числа витков в обмотках. Осуществляется это либо переключателем, либо с помощью скользящего контакта (щётки), перемещаемого непосредственно по зачищенным от изоляции виткам обмотки. Такие автотрансформаторы, называемые регуляторами напряжения, могут быть однофазными и трёхфазными.

### Импульсные трансформаторы

Импульсные трансформаторы применяются в устройствах импульсной техники для изменения амплитуды импульсов, исключения постоянной составляющей, размножения импульсов и т.п. Одно из основных требований, предъявляемых к импульсным трансформаторам, — минимальное искажение формы трансформируемых импульсов. В связи с этим магнитопроводы импульсных трансформаторов изготавливают из магнитных материалов с повышенной магнитной проницаемостью (холоднокатаная сталь, железоникелевые сплавы и др.) при толщине ленты 0,02...0,35 мм. Иногда магнитопровод делают из феррита.

### *Содержание отчёта*

1. Основные типы специальных трансформаторов.
2. Записать основные особенности трансформаторов тока и напряжения.
3. Основные сведения сварочных и выпрямительных трансформаторов.

### *Контрольные вопросы*

1. Назовите основные типы специальных трансформаторов.
2. В чём отличие специальных трансформаторов от силовых?
3. Как выбрать мощность трансформатора напряжения.

4. Назовите классы точности измерительных трансформаторов тока и напряжения.
5. Чем опасен режим холостого хода для трансформатора тока?
6. В каком режиме работают трансформаторы напряжения?
7. Для чего предназначен разделительный трансформатор?
8. Какие контрольно-измерительные приборы являются нагрузкой трансформаторов тока и напряжения?
9. Приведите работу схем выпрямительных трансформаторов с одно- и трёхфазным одно- и двухполупериодным выпрямлением переменного тока?
10. Что показывает коэффициент типовой мощности?
11. В чём особенность сварочного трансформатора?
12. В чём отличие трансформатора тока от силового трансформатора по принципу действия?
13. Почему нельзя разрывать вторичную цепь трансформатора тока?
14. Можно ли подключать приборы соединённые параллельно ко вторичной цепи трансформатора тока?
15. Для каких целей используют трансформаторы напряжения?
16. Для чего в бак трансформатора напряжения заливается масло?
17. Какое назначение имеют обмотки трансформатора напряжения?
18. Назовите достоинства и недостатки автотрансформаторной схемы включения.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Епифанов, А.П. Электрические машины [Текст] : учебник для вузов / А.П. Епифанов. — СПб. : Лань, 2006. - 272 с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).
2. Торопцев, Н.Д. Электрические машины сельскохозяйственного назначения [Текст] / Н.Д. Торопцев. — М. : КолосС, 2005. — 224 с.
3. Беспалов В.Я. Электрические машины [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. — М. : Академия, 2006. — 320 с. — (Высшее профессиональное образование. Электротехника).
4. Данилов, И.А. Электрические машины [Текст] : / И.А. Данилов, К.В. Лотоцкий. — М. : Колос, 1972. — 527 с. : ил.
5. Кацман М.М. Электрические машины [Текст] : / М.М. Кацман. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1990. — 463 с.
6. Копылов, И.П. Электрические машины : учебник для вузов / И.П. Копылов. — 2-е изд., перераб. — М. : Высшая школа; Логос, 2000. — 607 с.
7. Гольдберг, О.Д. Испытания электрических машин : учебник для вузов / О.Д. Гольдберг. — 2-е изд., испр. — М. : Высшая школа, 2000. — 255 с. : ил.
8. Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2001. — 430 с. : ил.
9. Кацман, М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу : учеб. пособие для сред. проф. образования / М.М. Кацман. — 2-е изд., испр. — М. : Высшая школа, 2000. — 215 с. : ил.
10. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / Копылов И.П., ред. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2002. — 757 с. : ил.

*Учебно-практическое издание*

**Олин, Д.М.** Электрические машины. Ч. I. Трансформаторы : лабораторный практикум для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / Д.М. Олин, М.С. Ётов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 58 с.

Гл. редактор Н.В. Киселева  
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева  
Корректор Т.В. Кулинич

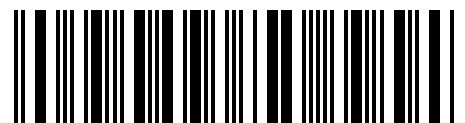
© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия" 156530, Костромская обл., Костромской район, пос. Караваево, уч. городок, д. 34, КГСХА

Компьютерный набор. Подписано в печать 10/06/2015.  
Заказ №320. Формат 84x60/16. Тираж 60 экз. Усл.  
печ. л. 3,6. Бумага офсетная. Отпечатано 24/07/2015.  
Цена 33,00 руб.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов в академической типографии на цифровом дубликаторе.  
Качество соответствует предоставленным оригиналам.  
вид издания: переработанное (редакция от 3.06.2015 № 305)



Цена 33,00 руб.



2015 \* 320