

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный  
технический университет»

Д. А. Тонн

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
И ЭЛЕКТРОНИКА: ТЕОРИЯ  
И ЛАБОРАТОРНАЯ ПРАКТИКА**

Учебное пособие

Воронеж 2019

УДК 621.3:621.38(075.8)

ББК 31.2:32.85я7

T573

*Рецензенты:*

*кафедра электроэнергетики Международного  
института компьютерных технологий, г. Воронеж  
(зав. кафедрой, д-р техн. наук, проф. А. Н. Анненков);  
д-р техн. наук, проф. К. Е. Кононенко*

**Тонн, Д. А.**

**Электротехника и электроника: теория и лаборатор-  
ная практика:** учебное пособие / Д. А. Тонн; ФГБОУ ВО  
T573 «Воронежский государственный технический университет».  
– Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2019. – 139 с.

ISBN 978-5-7731-0759-0

Учебное пособие предназначено для оказания методической помощи студентам при выполнении ими лабораторных работ по основным разделам дисциплины «Электротехника и электроника». Для каждой лабораторной работы приводятся подробные теоретические сведения, задание, схемы установок, описание обработки результатов эксперимента.

Издание соответствует требованиям ФГОС ВО направлений подготовки 15.03.01 «Машиностроение» и 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», дисциплине «Электротехника и электроника», и предназначено для студентов очной формы обучения.

Ил. 54. Табл. 13. Библиогр.: 9 назв.

**УДК 621.3:621.38(075.8)**

**ББК 31.2:32.85я7**

*Печатается по решению учебно-методического совета  
Воронежского государственного технического университета*

ISBN 978-5-7731-0759-0 © Тонн Д. А., 2019

© ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный техничес-  
кий университет», 2019

## ВВЕДЕНИЕ

«Электротехника и электроника» – дисциплина, содержащая теоретические сведения, применяемые на практике, о двух взаимосвязанных отраслях науки и техники: электронике и электротехнике. Рассмотрение этих дисциплин совместно позволяет глубже понять их взаимодополнение и взаимопроникновение, правильно применять основы теории электромагнитных процессов, методы расчёта сложных электрических цепей при проектировании, анализе режимов работы, эксплуатации промышленного и другого электрооборудования, схем электроники, в которых используются различные электронные компоненты и приборы.

Электротехника – дисциплина, предметом изучения которой являются технические и научные вопросы, связанные с генерацией, трансформацией, передачей и использованием электрической энергии в быту и в промышленности на практике.

Электроника – дисциплина, предметом изучения которой являются технические и научные вопросы, связанные с разработкой и использованием всевозможных электронных приборов, средств и схем в быту и в некоторых отраслях промышленности на практике.

Электрическая энергия существенно выигрывает по сравнению с другими видами энергии, так как достаточно просто трансформируется в другие виды энергий: энергию свет, механическую энергию, химическую и т.д., с минимальными потерями передается на огромные расстояния, распределяется между большим числом потребителей различного характера. Электроэнергия получила массовое применение во всех областях техники и в быту – в промышленности, на электротранспорте, в сельскохозяйственном производстве и др.

В различных отраслях промышленности активно идет комплексная автоматизация процессов производства. Появляются новые электротехнологии, сварочные агрегаты и ком-

плексы, автоматические поточные линии, промышленные роботы, обслуживающие конвейерные производства и т.д., поэтому освоение дисциплины «Электроника и электротехника» для будущего инженера современного производства является актуальной задачей.

Дисциплина «Электроника и электротехника» является одним из общетехнических курсов, необходимых для изучения профильных дисциплин студентами направлений подготовки направлений подготовки 15.03.01 «Машиностроение» и 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» очной формы обучения.

В курсе «Электроника и электротехника», наряду с изучением теоретических разделов, студенты должны получить навыки расчета токов, напряжений и мощностей в электрических цепях. В пособии приводятся подробные теоретические сведения по целому ряду важных и сложных разделов курса: линейные цепи постоянного тока; линейные цепи однофазного синусоидального тока; трансформаторы; и некоторым темам, посвященным основам электроники.

Материал данного учебного пособия может быть использован студентами других направлений подготовки очной формы обучения при выполнении расчетно-графических, курсовых, лабораторных работ, а также при их подготовке к практическим занятиям, экзаменам и зачетам по курсам «Электротехника», «Электроника» и «Электротехника и электроника».

## УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Во время лабораторных занятий, во избежание несчастных случаев, должны выполняться следующие требования:

1. Только после проведения преподавателем или лаборантом инструктажа по технике безопасности, пожарной безопасности с записью об этом в журнале по технике безопасности и личной подписью в нём инструктируемого, студенты допускаются для выполнения лабораторных работ к лабораторным стендам.

2. Действия и манипуляции по сборке электрических схем, внесение в них изменений выполняются только при выключенном напряжении питания стенда.

3. Запрещается использовать при сборке электрических схем соединительные провода с поврежденной изоляцией, без клемных наконечников, штырей. Необходимо надежно крепить клемные наконечники и штыри токоведущих проводов, а также стараться не допускать их перекрещивания.

4. Включение напряжения на собранные лабораторные схемы производится только после проверки правильности их сборки лаборантом или преподавателем.

5. Не разрешается во время проведения эксперимента дотрагиваться до неизолированных токоведущих элементов лабораторного стенда и схемы.

6. Запрещается оставлять включенную схему под напряжением, без присмотра.

7. Необходимо сообщать преподавателю или лаборанту обо всех проблемах и неисправностях в схеме и на лабораторном стенде, которые могут возникнуть при проведении эксперимента.

8. После окончания лабораторного эксперимента разбирать схему разрешается после команды лаборанта или преподавателя при отключенном напряжении питания стенда.

9. В случае возникновения аварийной ситуации необходимо быстро отключить лабораторный стенд от сети, для этого

студент должен незамедлительно нажать красную кнопку-грибок **АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ**, находящуюся на каждом стенде.

10. При поражении работающего в лаборатории электрическим током она должна быть незамедлительно обесточена, а пострадавшему необходимо оказать первую доврачебную медицинскую помощь. Если существует необходимость необходимо вызвать скорую медицинскую помощь.

## **ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ И ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. Перед выполнением лабораторной работы следует внимательно изучить раздел дисциплины «Электротехника и электроника», содержащей теоретические сведения по данной работе.

2. До того как приступить к выполнению соответствующей лабораторной работы, нужно произвести предварительные расчеты исследуемой электрической цепи.

3. Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на стандартных листах А4.

4. Отчет о выполнении лабораторной работы обязательно должен содержать:

- а) титульный лист;
- б) цель выполнения лабораторной работы;
- в) электрические и расчетные схемы замещения исследуемой лабораторной установки;
- г) предварительные расчеты исследуемой электрической цепи;
- д) таблицы экспериментальных и расчетных данных;
- е) графики и диаграммы, построенные на основании таблиц исследуемой электрической цепи;
- ж) выводы по проделанной лабораторной работе.

6. Результаты проведенных лабораторных исследований проверяются, подписываются преподавателем или лаборантом.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Цель работы: опытная проверка выполнения законов Кирхгофа; исследование распределения потенциалов в сложной электрической цепи постоянного тока; проверка выполнения уравнения баланса мощностей.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

#### **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Электротехника – это область науки и техники, изучающая магнитные и электрические явления и их использование в практических целях, для нужд промышленного производства.

В качестве важнейшего физического явления, которое изучается в электротехнике, выступает электрический ток, который представляет собой направленное упорядоченное движение элементарных заряженных частиц.

Различают три вида тока: проводимости, смещения, переноса. Ток проводимости возникает из-за направленного упорядоченного движения носителей заряда под воздействием электрического поля по проводнику. Ток в металлах (проводниках) представляет собой упорядоченное движение валентных электронов. Он возникает в результате дрейфа электронов и их беспорядочного теплового движения с относительно большой скоростью. Ток смещения (поляризации) возникает в диэлектрике за счет смещения под действием электрического поля противоположных по знаку зарядов. Ток переноса (конвекции) возникает из-за переноса

зарядов в пространстве заряженными частицами (телами) под воздействием электрического поля.

Количественную меру движения электронов в ГОСТе рассматривают как силу тока.

Величину электрического тока представляют как скорость изменения заряда во времени:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

где  $q$  – количество электричества (электрический заряд).

Таким образом, она представляет собой количество зарядов проследовавших через поперечное сечение проводника за единицу времени, и это величина является скалярной.

В результате расчетов ток может иметь разные знаки знаками. Он имеет положительный знак, если его направление совпадает с направлением движения положительных зарядов.

Ток измеряют в системе СИ в амперах (А) в честь французского ученого академика Андре Мари Ампера, который впервые ввел понятие электрического тока.

В системе СИ количество электричества измеряется в кулонах (Кл) в честь французского физика и инженера Шарля Кулона.

Ампер является силой тока, который, проходя по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и кругового сечения, стремящегося к нулю, расположенным на расстоянии 1 метр друг от друга в вакууме, вызывает между ними силу, равную 1 Н/м.

Кулон является количеством электричества, протекающим через поперечное сечение проводника за 1 секунду при неизменяющейся силе тока величиной в 1 А.

Ток в электрических цепях оказывает тепловое действие при протекании через проводники; химическое действие, при протекании через растворы и расплавы электролитов (электролиз); электродинамическое действие на проводники с



током; электромагнитное воздействие на магнитную стрелку. В электрических цепях ток проходит от положительного полюса источника электроэнергии к отрицательному. Учитывая, что движение электронов вызывает ток в проводниках, договорились принять за **направление электрического тока** направление противоположное электронному дрейфу. Электрический ток возникает только в замкнутой электрической цепи. Дадим ряд определений электрической цепи.

**Электрическая цепь** является совокупностью устройств и объектов, по которым течет электрический ток, т.е. происходит направленное и упорядоченное движение электрических зарядов.

**Электрическая цепь** – это совокупность устройств, предназначенных для производства, передачи, преобразования и применения электрической энергии или электромагнитной энергии, при этом процессы, протекающие в устройствах, описываются с помощью понятий об электрическом токе, электрическом напряжении, электродвижущей силе (ЭДС).

Электрическое напряжение – разность электрических потенциалов между точками или величина работы, которую совершит электрическое поле по переносу единичного положительного заряда из одной точки в другую.

Электрический потенциал численно равен работе поля по переносу единичного положительного заряда из данной точки пространства в бесконечно удалённую точку, потенциал которой принимается за нуль. Так как при расчетах электрической цепи, например, методом узловых потенциалов или, его частным случаем – методом двух узлов, потенциал одной из узлов принимается равным нулю, обычно интересует электрические напряжения на участках цепи или на её отдельных элементах, а не истинные значения потенциалов точек или узлов цепи.

Все электротехнические устройства электрической цепи по назначению, принципу действия и конструктивному оформлению можно разделить на три большие группы:

1. Источники энергии, т.е. устройства, вырабатывающие электрическую энергию (генераторы, термоэлементы, фотоэлементы, химические элементы и т.д.).

2. Приемники (потребители) или нагрузка, т.е. устройства, потребляющие электрическую энергию (электродвигатели, электролампы, электромеханизмы, нагревательные элементы и т.д.).

3. Проводники (соединительные провода), коммутационная, измерительная, защитная, аппаратура. При расчете и анализе электрических цепей принимаем, что эти элементы только выполняют свои функции и не влияют на режим работы электрической цепи и токораспределение.

Главным условием возникновения электрического тока цепи является присутствие в ней источника электроэнергии. На практике рассматривают не реальные электрические цепи, а их расчетные электрические схемами замещения.

**Электрическая схема замещения** – это графическое изображение электрической цепи с идеальными или идеализированными элементами, которые описывают физические явления, протекающие в реальной цепи, отражающие последовательность их соединения, их характер и свойства.

Источники электрической энергии или генераторы преобразуют различные виды энергии (механическую, химическую, тепловую, световую) в электрическую энергию.

В теории электрических цепей выделяют следующие виды идеализированных источников энергии: идеальный источник ЭДС (рис. 1.1, а) и идеальный источник тока (рис. 1.1, б).

У идеального источника ЭДС (рис. 1.1, б) бесконечно мало по сравнению с сопротивлением внешней цепи, которую он питает, поэтому напряжение на его зажимах, при изменении нагрузки в допустимых пределах, остается постоянным, а изменяется лишь ток. Стрелка на схеме источника показывает направление увеличения потенциала.

У идеального источника тока (рис. 1.1, б) внутреннее сопротивление бесконечно велико, по сравнению с сопротивлением внешней цепи, которую он питает, поэтому при изменении нагрузки в допустимых пределах ток источника тока не меняется, а изменяется лишь напряжение на его зажимах.

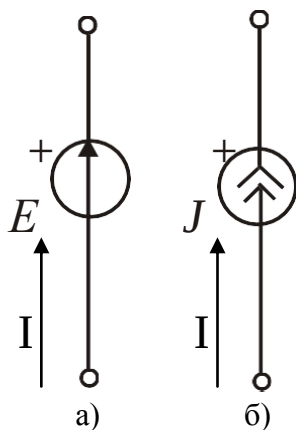


Рис. 1.1

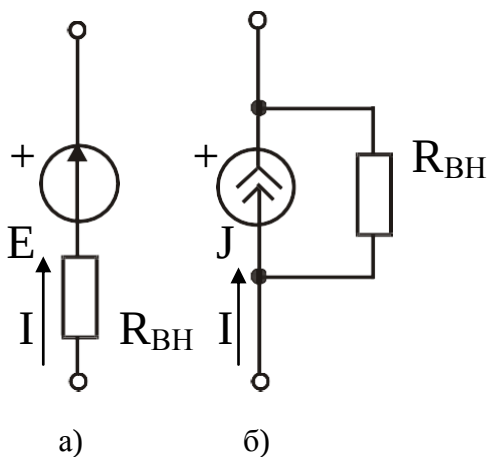


Рис. 1.2

Идеальных устройств в реальной физике нет. Реальный источник ЭДС обладает небольшим внутренним сопротивлением по сравнению с сопротивлением внешней цепи, которую он питает (рис. 1.2, а), а реальный источник тока обладает большим, но конечным сопротивлением, по сравнению с сопротивлением внешней цепи, которую он питает (рис. 1.2, б).

Напряжение источника ЭДС  $U_E$  направленно встречно его электродвижущей силе, а положительное направление тока совпадает с направлением ЭДС.

Напряжение идеального источника ЭДС определяется как:  $U_E = E$ .

Напряжение реального источника ЭДС определяется как:  $U_E = E - R_{вн} I$ .

Напряжение источника тока  $U_J$  направленно встречно его электрическому току, а положительное направление тока совпадает с направлением источника.

Ток ветви, содержащей идеальный источник тока:

$$I = J.$$

Ток ветви, содержащей реальный источник тока:

$$I = J - I_{вн} = J - \frac{U_J}{R_{вн}} = J - g_{вн} U_J, \quad (2)$$

где  $g_{вн} = \frac{1}{R_{вн}}$  – проводимость, которая в системе СИ

измеряется в сименсах (См).

В приемниках (потребителях, нагрузках) происходит обратное преобразование электрической энергии в другие виды энергии. Все приемники характеризуются электрическим сопротивлением.

Те потребители электроэнергии, для которых зависимость тока от напряжения  $I=f(U)$  или напряжения от тока  $U=f(I)$  является прямой линией и сопротивление их постоянно и не меняется во времени, называются линейными элементами электрической цепи. Цепь из таких элементов называется ли-

нейной электрической цепью.

Для линейных элементов (ЛЭ) характерна линейная симметричная вольт-амперная характеристика (ВАХ), выглядящая как прямая линия, проходящая через начало координат под определенным углом к координатным осям (рис. 1.3). Это свидетельствует о том, что для линейных элементов и для линейных электрических цепей закон Ома строго выполняется.

Если же для элемента электрической цепи зависимость тока от напряжения или напряжения от тока не линейна и сопротивление меняется с течением времени, то есть зависит от тока или от напряжения, то такие элементы называются нелинейными (НЭ). Электрическая цепь, включающая хотя бы один нелинейный элемент, называется нелинейной электрической цепью.

Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента уже не является прямой линией на графике (рис. 1.3), она непрямолинейна и часто несимметрична, как например, у полупроводникового диода.

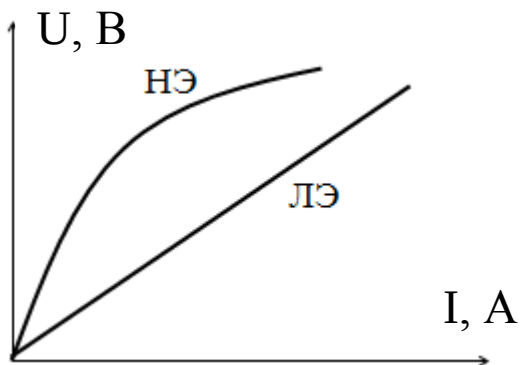


Рис. 1.3. Вольт-амперные характеристики линейного (ЛЭ) и нелинейного (НЭ) элементов электрической цепи

Для проведения расчетов разветвленных электрических цепей и их схем введем ряд определений.

**Ветвь** – часть электрической схемы, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных элементов цепи, в которых протекает один и тот же ток.

Можно сказать и по-другому **Ветвь** – участок цепи с одним током. Ветви бывают активными, и содержат источники электроэнергии, и пассивными, состоящими только из приемников (потребителей).

**Узел** – это место в схеме, где соединяются не менее трех ветвей. Тогда **ветвь** – участок схемы между двумя узлами.

**Контур** – любой замкнутый путь, проходящий по ветвям схемы. Схема может содержать один или несколько контуров. Элементарным или независимым называется контур схемы, отличающийся от другого хотя бы одним элементом.

## **ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Основой для анализа физических процессов, возникающих в каждой электрической цепи, являются законы Ома и Кирхгофа. Используя только эти фундаментальные законы, в случае, когда известны параметры электрической цепи, рассчитывают токи во всех ветвях, а затем и напряжения на всех элементах. Возможно решить и обратную задачу, которая состоит в определении параметров элементов цепи, когда известны токи и напряжения на всех её участках.

Законом Ома представляет собой соотношение, которое связывает ток и напряжение. Закону Ома на участке цепи без источника ЭДС (рис. 1.4) формулируется так: напряжение на резистивном (активном) элементе цепи пропорционально его электрическому току. Коэффициент пропорциональности между напряжением и током называется сопротивлением:

$$U_{ab} = RI = I/g. \quad (3)$$

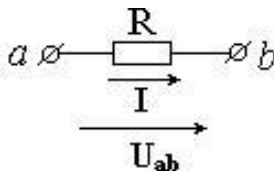


Рис. 1.4

Закон Ома можно сформулировать и так:

$$I = U/R = gU.$$

Падением напряжения или напряжением на сопротивлении (элементе) называется произведение тока этого сопротивления (элемента) на величину самого сопротивления.

Геометрически интерпретировать закон Ома можно вольт-амперной характеристикой (ВАХ) (рис. 1.3). Для линейного сопротивления (элемента) эта характеристика представляет собой прямую линию.

Обобщенный законом Ома записывается для участка цепи, содержащего в своём составе источник ЭДС (рис. 1.5). Рассмотрим участок  $ac$ , по которому протекает ток от точки  $a$  к  $c$ . Очевидно, что потенциал точки  $a$   $\varphi_a$  больше, чем потенциал точки  $c$   $\varphi_c$ . Имеем, что напряжение  $U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c > 0$ , тогда положительное направление напряжения  $U_{ac}$  совпадает с направлением тока. Прибавим и вычтем из напряжения  $U_{ac}$  потенциал точки  $b$   $\varphi_b$ .

Имеем:

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_b + \varphi_b - \varphi_c = U_{ab} + U_{bc} \quad (4)$$

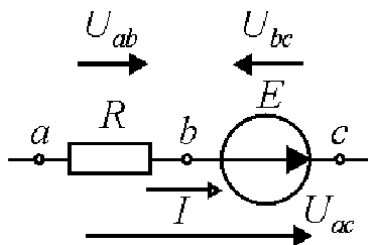


Рис. 1.5 [1]

Положительные направления напряжения и тока на резисторе на участке  $ab$  всегда совпадают, при этом  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = RI$ . Из курса физики известно, что напряжение на клеммах источника ЭДС всегда направлено встречно с ЭДС:  $U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = -E$ , тогда имеем  $U_{ac} = RI - E$ . Если ЭДС и ток разнонаправлены, то изменится направление, знак напряжения  $U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = E$ , и тогда напряжение на  $ac$  равно  $U_{ac} = RI + E$ . В общем случае

$$U_{ac} = RI \pm E, \quad (5)$$

а ток равен

$$I = (U_{ac} \pm E) / R. \quad (6)$$

Если ЭДС и ток направлены в одну сторону, то в уравнении в этой ситуации ставится знак плюс, а если в разные – минус.

В общем случае участок электрической цепи может содержать  $m$  источников ЭДС и  $p$  резистивных элементов. Тогда в общем виде выражение для тока можно представить следующим уравнением

$$I = \frac{U_{ac} + \sum_{k=1}^m \pm E_k}{\sum_{n=1}^p R_n}, \quad (7)$$



где, если направления тока и ЭДС совпадают, то знак перед ЭДС положительный.

**Законы Кирхгофа** являются частными следствиями фундаментальных законов физики при их применении в электрических цепях.

**Первый закон Кирхгофа** объединяет токи в ветвях, которые подходят к узлу схемы электрической цепи. Этот закон выражает принцип непрерывности тока в электрической цепи. Идеализированный узел электрической цепи не накапливает, а также не преобразует электрическую энергию. Заключив узел в замкнутую поверхность  $S$  (рис. 1.6), имеем, что число электрозарядов, вошедших во внутрь поверхности  $S$  за определенный интервал времени, равно числу электрозарядов вышедших из неё во вне.

При движении зарядов в электрической цепи, в ней возникает электрический ток, тогда описанное выше, можно записать в виде

$$\sum_{n=1}^k \pm I_n = 0. \quad (8)$$

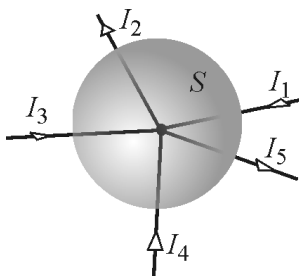


Рис. 1.6 [1]

Данное выражение представляет собой **первый закон Кирхгофа**, который имеет следующую формулировку: в узлах электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю. Рекомендуется токи, направленные к узлу принимать в этой

сумме положительными, а от узла – отрицательными.

Первый закон Кирхгофа записывают и так: сумма токов входящих в узел равна сумме токов выходящих из него [1]

$$\sum_{p=1}^m I_p = \sum_{g=1}^{n-m} I_g . \quad (9)$$

Одной из форм записи фундаментального физического закона сохранения энергии выступает **второй закон Кирхгофа**.

Этот закон имеет следующую формулировку: алгебраическая сумма напряжений на элементах, включенных в замкнутый контур любой электрической цепи, равна алгебраической сумме ЭДС, включенных в этот же контур. Для контура с числом  $t$  резисторов и  $h$  источников ЭДС второй закон Кирхгофа можно представить так:

$$\sum_{p=1}^t \pm U_p = \sum_{g=1}^h \pm E_g . \quad (10)$$

В этих суммах положительные знаки будут приниматься у ЭДС и напряжений, которые направлены в ту же сторону, что и произвольно выбранное направление обхода рассматриваемого контура, а отрицательные – направленные в обратную сторону с направлением обхода контура.

Если применять закон Ома, то это выражение примет следующий вид:  $\sum_{p=1}^m R_p (\pm I_p) = \sum_{g=1}^n \pm E_g$ .

Второй закон Кирхгофа можно переформулировать: в элементарном контуре любой электрической цепи, который является замкнутым, алгебраическая сумма падений напряжений на всех элементах (активных и пассивных), входящих в его состав, равна нулю.

Применяя законы Кирхгофа, токи в ветвях электрической цепи можно рассчитать при известных значениях всех сопротивлений и величинах, направлениях всех ЭДС в цепи.

При этом необходимо придерживаться следующей последовательности расчета: произвольно выбирают направления обходов контуров и положительные направления токов в ветвях схемы, а затем, используя законы Кирхгофа, составляют и решают систему алгебраических уравнений, как правило линейных. Число уравнений этой системы равно числу ветвей цепи, где токи не определены. Уравнений на одно меньше, чем число узлов в схеме, составляют по первому закону Кирхгофа. По второму закону Кирхгофа составляют недостающие уравнения системы, число которых равно числу элементарных контуров в рассматриваемой цепи. Если после решения составленной по законам Кирхгофа системы уравнений величина любого тока получится меньше нуля, то имеем, что действительное положительное направление этого тока противоположно, выбранному ранее. По рассчитанным значениям токов, вычисляют напряжения на всех участках схемы и потребляемые или выделяемые во всех элементах цепи мощности [2].

## БАЛАНС МОЩНОСТЕЙ

Уравнение баланса мощностей в электрической цепи представляет собой закон сохранения энергии, применимый в теории цепей.

ЭДС является работой по переносу электрического единичного заряда от одного полюс источника энергии к другому. Для переноса всех электрических зарядов, протекающих через источник электроэнергии, нужно сделать в  $q$  раз большую работу, то есть потратить энергию

$$W_{\text{ЭДС}} = EIt = Eq. \quad (11)$$

Электроэнергия у потребителя, с учетом всех потерь, переходит в другой вид энергии. Используя определение напряжения на участке электрической цепи работу приёмника электроэнергии можно представить, как работы по перемещению единичного электрического заряда, тогда энергия, преобразуемая в потребителе равна

$$W_{\text{пот}} = Uq = UI t. \quad (12)$$

Величина мощности характеризует, как интенсивно идет преобразование энергии. Численно мощность равна энергии, которая преобразуется в цепи за единицу времени. В цепи постоянного тока мощность источника ЭДС равна

$$P_{\text{ист}} = W_{\text{ист}} \text{ ЭДС} / t = EI, \quad (13)$$

а потребителя

$$P_{\text{пот}} = W_{\text{пот}} / t = UI = RI^2. \quad (14)$$

Энергия в электрической цепи измеряется в джоулях (Дж). Мощность в электрической цепи измеряются в ваттах (Вт).

Применяя закон сохранения энергии, имеем, что вся мощность, выделяемая генераторами электроэнергии в цепи, расходуется и преобразуется в потребителях с учетом всех потерь:

$$\sum_{K=1}^m E_K I_K = \sum_{K=1}^n R_K I_K^2, \quad (15)$$

где  $\sum_{K=1}^m E_K I_K$  – алгебраическая сумма мощностей, генерируемых источниками ЭДС;

$\sum_{K=1}^n R_K I_K^2$  – сумма мощностей всех потребителей с учетом всех потерь.

Это выражение является уравнением баланса мощностей в электрической цепи.

Электрическая мощность, преобразуемая у потребителя в другие виды энергии, всегда больше нуля. Источники ЭДС могут работать как в режиме генератора, так и в режиме потребителя электроэнергии. Режим работы источника ЭДС зависит от направлений ЭДС и его тока. Если направления

тока и ЭДС у источника одинаковы, то он работает в режиме генерации электрической энергии, и его мощность входит уравнение баланса мощностей положительной величиной. Если направления тока и ЭДС различны, то он работает в режиме потребителя, и его мощность входит в уравнение баланса отрицательной. При составлении уравнения баланса мощностей необходимо учитывать реальные направления токов, которые следует брать из расчета электрической цепи, а не те условно положительные направления, которые принимаются в начале расчета.

Если в электрической цепи кроме источников ЭДС имеются еще и источники тока, то уравнение баланса мощностей примет следующий вид:

$$\sum_{K=1}^m E_K I_K + \sum_{K=1}^g U_{JK} J_K = \sum_{K=1}^n R_K I_K^2, \quad (16)$$

где  $\sum_{K=1}^g U_{JK} J_K$  – алгебраическая сумма мощностей, раз-

виваемых источниками тока.

Для источника тока мощность  $P_J = U_J J = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot J$  может быть как положительной, так и отрицательной. Если  $\varphi_2 > \varphi_1$  ( $U_J > 0$ ), то мощность положительна, и тогда источник работает в режиме генерации. Если же  $\varphi_2 < \varphi_1$  ( $U_J < 0$ ), то мощность отрицательна, и тогда источник работает в режиме потребления или нагрузки [2].

Выполнение баланса мощностей является одним из критериев правильности расчета электрической схемы исследуемой цепи.

## ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГРАММА

В целом ряде ситуаций при изучении или же при расчетах электрических цепей необходимо определить значение по-

тенциалов каких-либо точек цепи и по результатам построить потенциальную диаграмму. Потенциальной диаграммой называют графическое представление того как распределяются потенциалы вдоль контура.

При определении потенциалов на участке электрической цепи или в замкнутом контуре потенциал одной из точек условно принимают за нуль, например её заземляют.

На потенциальной диаграмме эту опорную точку помещают в начало координат. По оси абсцисс откладывается в масштабе величина сопротивлений участков цепи (элементов) электрической цепи в том порядке, в котором происходил расчет потенциалов, то есть последовательно, друг за другом (каждое следующее сопротивление прибавляют к предыдущему сопротивлению). По оси ординат – значение потенциала соответствующей точки.

Значение потенциала любой точки электрической цепи определяется напряжением между данной точкой и опорной точкой цепи с потенциалом равным нулю.

Рассмотрим пример построения потенциальной диаграммы. Предположим, что для электрической цепи, показанной на рис. 1.7, известны токи в ветвях:  $I_1=2$ ,  $I_4=1$  А,  $I_5=3$  А; величины ЭДС:  $E_1=5$  В;  $E_4=3$  В,  $E_5=8$  В и величины сопротивлений:  $R_1=2$  Ом;  $R_2=3$  Ом;  $R_3=5$  Ом;  $R_4=3$  Ом,  $R_5=1$  Ом. Необходимо построить потенциальную диаграмму по контуру «abcdea» [3].

Заземлим точку «а», приняв ее потенциал,  $\varphi_a=0$ . Определим потенциалы остальных точек контура «abcdea».

Значение потенциала точки b больше значения потенциала точки a на величину равную ЭДС  $E_1$ , что справедливо потому, что распределение потенциалов на клеммах источника ЭДС не зависит от его тока, и она всегда направлена в сторону большего потенциала:

$$\varphi_b = \varphi_a + E_1, \varphi_b = 0 + 5 = 5 \text{ В.} \quad (17)$$

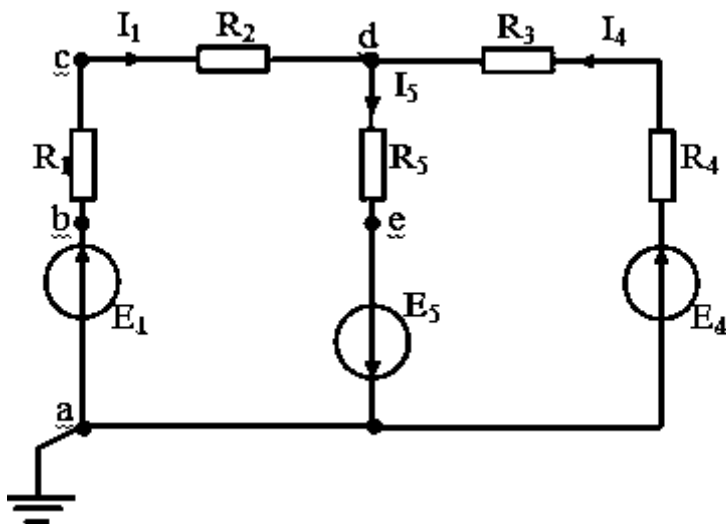


Рис. 1.7. Схема электрической цепи, для которой необходимо построить потенциальную диаграмму [3]

Заземлим точку «а», приняв ее потенциал,  $\varphi_a=0$ . Определим потенциалы остальных точек контура «abcdea».

Значение потенциала точки b больше значения потенциала точки a на величину равную ЭДС  $E_1$ , что справедливо потому, что распределение потенциалов на клеммах источника ЭДС не зависит от его тока, и она всегда направлена в сторону большего потенциала:

$$\varphi_b = \varphi_a + E_1, \varphi_b = 0 + 5 = 5 \text{ В.} \quad (18)$$

Потенциал точки c меньше, чем потенциал точки b на величину падения напряжения на элементе  $R_1$ , так как его ток течет от точки b к точке c:

$$\varphi_c = \varphi_b - R_1 I_1, \varphi_c = 5 - 2 \cdot 2 = 1 \text{ В.} \quad (19)$$

Потенциал точки d меньше, чем потенциал точки c на величину падения напряжения на элементе  $R_2$ , так как его ток течет от точки c к точке d:

$$\varphi_d = \varphi_c - R_2 I_1, \quad \varphi_d = 1 - 3 \cdot 2 = -5 \text{ В.} \quad (20)$$

Потенциал точки e меньше, чем потенциал точки d на величину падения напряжения на элементе  $R_5$ , так как его ток течет от точки d к точке e:

$$\varphi_e = \varphi_d - R_5 I_5, \quad \varphi_e = -5 - 1 \cdot 3 = -8 \text{ В.} \quad (21)$$

Потенциал точки a больше потенциала точки d на величину ЭДС  $E_5$ :

$$\varphi_a = \varphi_e + E_5, \quad \varphi_a = -8 + 8 = 0 \text{ В.} \quad (22)$$

При правильном расчете токораспределения в схеме потенциал  $\varphi_a = 0$ . Потенциальная диаграмма для рассматриваемого контура представлена на рис. 1.8.

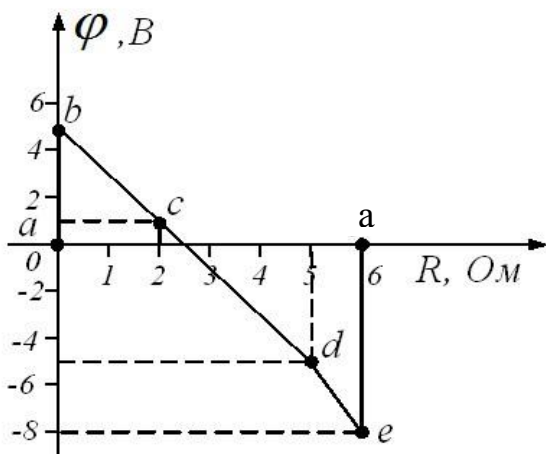


Рис. 1.8. Потенциальная диаграмма для контура «abcdea» [3]



## ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ

1. Используя рекомендуемую литературу, конспект лекции и настоящее руководство, повторить разделы курса «Электротехника и электроника», в которых рассматриваются законы Ома и Кирхгофа, методы расчета электрических цепей, основанные на этих законах.

2. Изучить способ построения потенциальных диаграмм и рассмотреть, как составляется уравнения баланса мощностей в электрических цепях постоянного тока.

## ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Измерить ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  источников, расположенных на лабораторном стенде. Данные измерений занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

| $E_1$ ,<br>В | $E_2$ ,<br>В | $U_{E1}$ ,<br>В | $U_{E2}$ ,<br>В | $I_1$ ,<br>А | $I_2$ ,<br>А | $I_3$ ,<br>А | $U_{R1}$ ,<br>В | $U_{R2}$ ,<br>В | $U_{R3}$ ,<br>В |
|--------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|              |              |                 |                 |              |              |              |                 |                 |                 |

2. Собрать исследуемую электрическую цепь (рис. 1.8). Номиналы сопротивлений  $R_1 \div R_3$  согласно варианту указаны на лабораторном стенде. В работе исследуется электрическая цепь, содержащая два источника ЭДС, монтажная схема которой приведена на рис. 1.9.

3. Измерить токи в ветвях цепи и напряжения на зажимах источников и приемников электрической энергии. Данные измерений занести в табл. 1.1.

4. По данным измерений п. 3 рассчитать сопротивления резисторов и внутренние сопротивления источников ЭДС, пользуясь законом Ома. Данные расчетов занести в табл. 1.2.

Составить расчетную схему замещения исследуемой цепи с учетом внутренних сопротивлений источников энергии. Для этого необходимо исключить из схемы амперметры и ввести в неё внутренние сопротивления источников ЭДС.

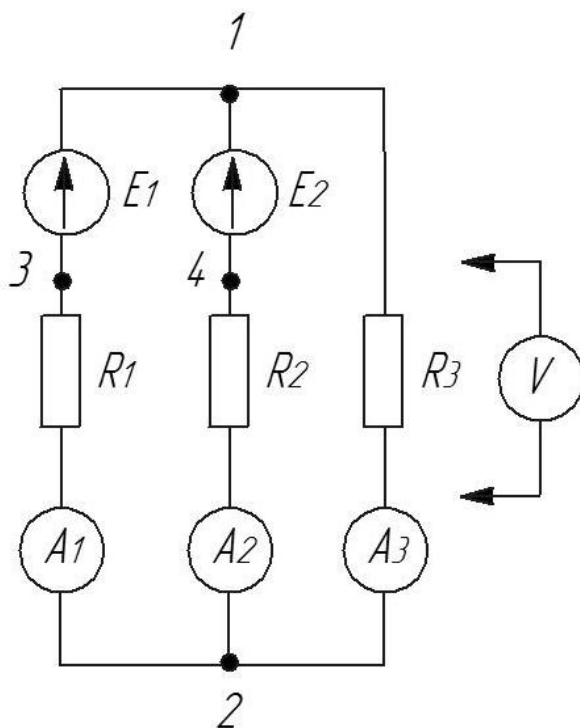


Рис. 1.9. Монтажная схема  
исследуемой электрической цепи

Таблица 1.2

| $R_{B1},$<br>Ом | $R_{B2},$<br>Ом | $R_1,$<br>Ом | $R_2,$<br>Ом | $R_3,$<br>Ом |
|-----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
|                 |                 |              |              |              |

5. Измерить потенциалы точек схемы относительно точки, потенциал которой, принимается равным нулю. Номер точки, потенциал которой, принимается за нулевой, указан согласно варианту в табл. 1.3. Данные измерений занести в табл. 1.4.

Таблица 1.3

|                                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номер<br>варианта               | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Номер<br>точки с<br>$\varphi=0$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 |

Таблица 1.4

|                        |                        |                        |                        |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $\varphi_1, \text{ В}$ | $\varphi_2, \text{ В}$ | $\varphi_3, \text{ В}$ | $\varphi_4, \text{ В}$ |
|                        |                        |                        |                        |

6. Определить направления токов в ветвях электрической цепи. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа для схемы замещения исследуемой цепи.

Подставив в эту систему уравнений численные значения токов, сопротивлений и ЭДС из данных табл. 1.1 и 1.2, убедиться в выполнении законов Кирхгофа.

7. Для контура цепи, содержащего два источника ЭДС, построить потенциальную диаграмму, используя данные табл. 1.1, 1.2 и 1.4.

8. Составить уравнение баланса мощностей и проверить его выполнение.

9. Сделать выводы о проделанной работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение схемы электрической цепи и её основных элементов.

2. Поясните закон Ома. Покажите применение закона Ома для определения тока на участке, содержащем источник ЭДС.

3. Поясните законы Кирхгофа.

4. Определение тока в ветвях электрической схемы пу-

тем непосредственного применения законов Кирхгофа.

5. Как в лабораторной работе определялись сопротивления приемников и внутренние сопротивления источников электрической энергии?

6. Определение мощности источников и приемников электрической энергии. Уравнение баланса мощностей.

7. Поясните составление уравнения баланса мощностей.

8. Что такое потенциальная диаграмма? Объясните принцип её построения.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**

Цель работы: экспериментальное определение параметров пассивных элементов электрической цепи; исследование влияния переменного параметра (емкости конденсатора  $C$ ) на величины тока и напряжения в неразветвленной цепи, исследование режима резонанса напряжений; исследование разветвленной цепи однофазного синусоидального тока; получение навыков построения векторных диаграмм по опытным данным.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

#### **ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**

На практике в промышленных масштабах в качестве переменного тока широкое используется ток, изменяющийся по синусоидальному закону, что обусловлено целым рядом его преимуществ перед постоянным током:

1) генераторы синусоидального тока существенно проще по конструкции и, следовательно, дешевле в производстве и эксплуатации, чем генераторы постоянного тока;

2) передача от производителя к потребителю, распределение между потребителями и преобразование электроэнергии переменного тока существенно экономичнее, чем энергии постоянного тока;

3) двигатели на переменном токе обладают более простой, надежной, дешевой в производстве и технологичной конструкцией, чем двигатели на постоянном токе, следовательно, их производство и эксплуатация более выгодны;

4) переменный ток при необходимости достаточно просто можно преобразовать (выпрямить) в постоянный;

Сейчас переменный синусоидальный ток повсеместно используется в силовом электроприводе, в системах освещения, на электротранспорте, в сельском хозяйстве и быту, в системах связи и автоматизации и т.д.

Переменным называют токи, напряжение, ЭДС, которые меняются во времени, как по величине, так по направлению. Синусоидальный ток является действительной гармонической функцией времени (синусойдой или косинусойдой):

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (23)$$

где  $I_m$  – амплитудное (максимальное) значение тока;  
 $(\omega t + \psi_i)$  – фаза колебания (аргумент синусоидальной функции);

$\omega$ , рад/с – угловая частота, причем  $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi/T$ ;

$f$ , Гц или  $\text{с}^{-1}$  – линейная частота, равная числу колебаний за одну секунду;

$T$ , с – период колебаний – это время, за которое совершается одно колебание;

$\psi_i$  – начальная фаза синусоидального тока.

Начальная фаза тока отсчитывается от ближайшей точки на оси абсцисс, где синусоидальная функция переходит через ноль от её отрицательных к её положительным значениям, до начала координат. Начальная фаза измеряется в градусах.

В правой части выражения для синусоидального тока только величина время  $t$  является переменной. Все остальные величины – постоянные константы. Значение синусоидальной функции в фиксированный момент времени называют **мгновенным значением** и, как правило, обозначают  $i$  или  $i(t)$ . Мгновенное значение зависит от трех параметров: амплитуды, угловой частоты или периода, начальной фазы колебания.

Любая синусоидально изменяющаяся функция времени определяется тремя величинами: амплитудой, угловой частотой и начальной фазой.

В нашей стране и ряде стран Западной Европы про-

мышленная частота тока составляет 50 Гц, а в США – 60 Гц.

Волновой или временной диаграммой называется графическое изображение синусоидальной функции времени. Для ее построения по оси абсцисс в соответствующем масштабе откладывается время  $t$  или угол  $\omega t$ .

На рис. 2.1 показаны временные диаграммы мгновенных значений тока и напряжения одинаковой частоты, но с разными начальными фазами:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (24)$$

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (25)$$

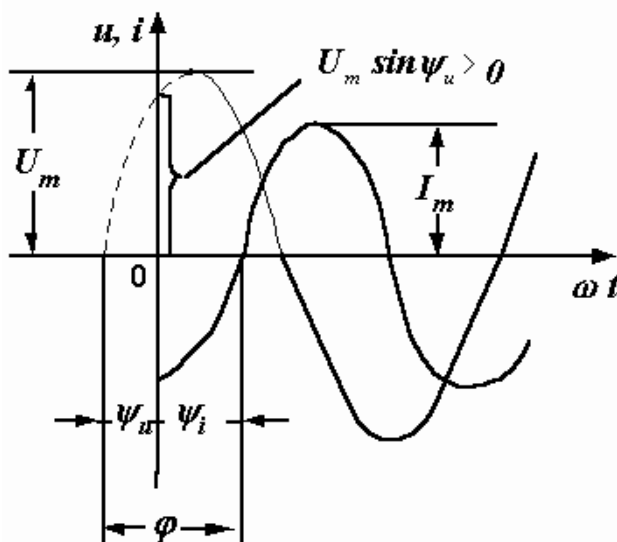


Рис. 2.1. Временные диаграммы синусоидального тока и напряжения [4]

При построении принимали начальную фазу напряжения  $\psi_u > 0$ , а начальную фазу тока  $\psi_i < 0$ .

Сначала рассмотрим временную диаграмму напряжения. В момент времени  $t = 0$  мгновенное значение напряжения будет составлять  $u(t) = U_m \sin(\psi_u)$ . Если  $\psi_u > 0$ , то и эта величина

положительна. Начало синусоиды сдвинуто влево относительно начала координат на  $\psi_u$ . Начало кривой тока, так как она обладает отрицательной начальной фазой  $\psi_i < 0$ , сдвинуто вправо относительно начала координат. Если у двух синусоидальных функций, имеющих одинаковую частоту, начальные фазы имеют различные значения, то принято говорить, что они не совпадают по фазе.

Отрезок на оси ординат между началами двух синусоидальных функций называется углом сдвига фаз  $\varphi$  (рис. 2.1), он численно равен разности начальных фаз кривых тока и напряжения.

Таким образом, угол, на который синусоидальная функция тока сдвинута относительно синусоидальной функции напряжения, называют **углом сдвига фаз  $\varphi$** . Угол  $\varphi$  рассчитывают как разность начальных фаз синусоидальных функций напряжения и тока:  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ .

В случае, когда  $\psi_u > \psi_i$ , тогда угол  $\varphi > 0$ , и имеем, что по фазе напряжение опережает ток на угол  $\varphi$ , или, что по фазе ток отстает от напряжения на угол  $\varphi$ . В случае, когда  $\psi_u < \psi_i$ , тогда угол  $\varphi < 0$ , и имеем, что по фазе напряжение отстает от тока на угол  $\varphi$ , или что по фазе ток опережает от напряжения на угол  $\varphi$ . В случае, когда  $\psi_u = \psi_i$ , тогда угол  $\varphi = 0$ , и имеем, что по фазе напряжение и ток совпадают.

Кроме уже рассмотренных выше характеристик синусоидального тока и синусоидального напряжения при проведении практических расчетов применяют понятия среднего, действующего значений этих величин.

За среднее значение синусоидального тока принимают величину его среднего значения за положительный полупериод:

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{2}{T} I_m \left( -\frac{1}{\omega} \cdot \cos \omega \cdot \frac{T}{2} + \frac{1}{\omega} \cdot \cos \omega \cdot 0 \right) = \quad (26)$$

$$= \frac{2 \cdot I_m}{\omega \cdot T} (\cos 0 - \cos \pi) = \frac{2 \cdot I_m \cdot 2 \cdot T}{2\pi T} = \frac{2I_m}{\pi}.$$

Имеем, что величина среднего значения синусоидаль-



ного тока равна  $2/\pi \approx 0,64$  от его амплитуды.

Аналогичные рассуждения справедливы и для среднего значения синусоидального напряжения:

$$U_{\text{ср}} = \frac{2U_m}{\pi}. \quad (27)$$

Так как в электрических цепях необходимо выполнять различные технические измерения, то вводят понятие действующего значения синусоидального тока. В электротехнике используются не только синусоидальные кривые токов и напряжений, поэтому измерения амплитуды этих кривых не даст желаемого результата.

Возможно, встретить случай, когда разные по форме функции тока, имеющие одинаковые максимальные или амплитудные значения, оказывают в цепи различное воздействие.

В связи с этим целесообразно оценивать величину тока работой, которую он совершит. Тогда логично влияние переменного тока сравнивать с влиянием постоянного тока.

Если переменный синусоидальный ток, протекая через участок цепи, оказывая тепловое действие, генерирует на нем определенное количество тепла, что и постоянный ток за его период, то считают, что действующим значением переменного синусоидального тока является величина данного постоянного тока.

**Действующим значением переменного тока считают величину постоянного тока, который за один период, выделяет в активном сопротивлении столько же тепла, что и переменный ток.**

Рассчитаем количество теплоты, выделяющейся в активном сопротивлении за период  $T$  при прохождении через него переменного синусоидального тока  $i(t)$ , что позволит оценить его действующее значение. Имеем, что данное количество теплоты вычисляется следующим образом:

$$W = \int_0^T i^2(t) \cdot R dt. \quad (28)$$

Рассмотрим постоянный ток  $I$ , который за время  $T$  в активном сопротивлении, такой же величины, выделит такое же количество тепла, что и переменный синусоидальный ток  $i(t)$ . Имеем, что данное количество теплоты вычисляется следующим образом:

$$W = I^2 R T. \quad (29)$$

Приравняв выражения для количества теплоты имеем

$$\int_0^T i^2(t) \cdot R dt = I^2 R T, \quad (30)$$

тогда действующие значение переменного синусоидального тока является средним квадратичным значением синусоидального тока за период

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m \cdot \sin(\omega t))^2 dt}. \quad (31)$$

Так как выражение под знаком квадратного корня имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T (I_m \cdot \sin(\omega t))^2 dt &= \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) dt = \\ &= \frac{I_m^2}{T} \int_0^T \left[ \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) \right] dt = \frac{I_m^2}{2T} \left( \int_0^T dt - \int_0^T \cos 2\omega t \cdot dt \right) = \frac{I_m^2}{2}, \end{aligned} \quad (32)$$

тогда имеем:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (33)$$

Имеем, что действующее значение синусоидального тока меньше его амплитуды в  $\sqrt{2}=1,41$  раза. Аналогичные рассуждения можно провести и для определения действующее значение синусоидального напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (34)$$

Когда оценивают или рассчитывают величины пере-

менного синусоидального напряжения или тока, то всегда ведут речь об их действующих значениях. Электроизмерительные приборы практически всех систем измеряют действующие значения напряжений и токов. Тогда, целесообразно все виды расчетов в цепях синусоидального тока проводить в действующих значениях, чтобы в дальнейшем их сравнивать с результатами эксперимента без дополнительного перевода.

## **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ВРЕМЕНИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ВЕКТОРАМИ. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ**

Синусоидальную функцию, зависящую от времени, представляют вектором длиной равной амплитуде этой функции, который вращается равномерно относительно начала координат с угловой частотой  $\omega$ . Положение вектора для момента времени  $t=0$  зависит от его начальной фазы  $\psi_i$ .

Временная диаграмма синусоидального тока  $i(t)=I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  и вектор тока  $I_m$ , который вращается равномерно относительно начала координат с угловой частотой  $\omega$  представлены на рис. 2.2.

При представлении синусоидальных функций токов, ЭДС и напряжений из начала координатных осей строят вектора длиной равных амплитудам соответствующих величин в выбранном масштабе.

Вектора ориентируют под углом, который равен их начальным фазам  $\psi$ , к оси абсцисс, в интересующий момент времени. Положительные значения начальных фаз и соответствующих им углов  $\psi$  откладываются против движения часовой стрелки, а отрицательные — по ходу движения часовой стрелки.

Если вектор вращается против движения часовой стрелки имеем то, что он составляет с осью абсцисс угол, равный  $(\omega t + \psi)$  для фиксированного момента времени, равного  $t$ . Если

его проецировать на ось ординат, то получим отрезок равный мгновенному значению этой синусоидальной функции.

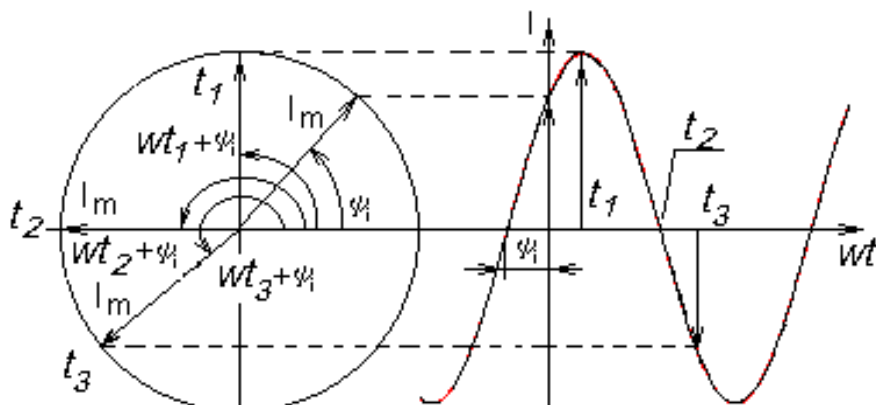


Рис. 2.2 [5]

**Векторной диаграммой** называют совокупность построенных на плоскости для конкретного момента времени  $t$  векторов токов напряжений и ЭДС, имеющих одинаковую частоту.

В случае рассмотрения установившихся режимов в цепи длины векторов равны действующим значениям соответствующих им величин, а сами они неподвижны.

Вектора подчиняются любым действиям векторной алгебры, например, суммированию, умножению и т.д.

Покажем на рис. 2.3 векторную диаграмму, на которой изображены вектора амплитудных значений токов  $\dot{I}_{1m}, \dot{I}_{2m}$  и вектор амплитудного значения суммы  $\dot{I}_{3m} = \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m}$ . Углы начальные фазы векторов токов  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ , представляют собой углы относительно оси абсцисс.

Векторные диаграммы часто применяют при расчете электрических цепей переменного синусоидального тока.

Как правило, векторные диаграммы строят для начального момента времени  $t=0$ , когда его угол направления вектора к горизонтальной оси равен его начальной фазе. Если же по условию расчета  $t \neq 0$ , то вектор показывается в произвольный момент времени  $t$ .

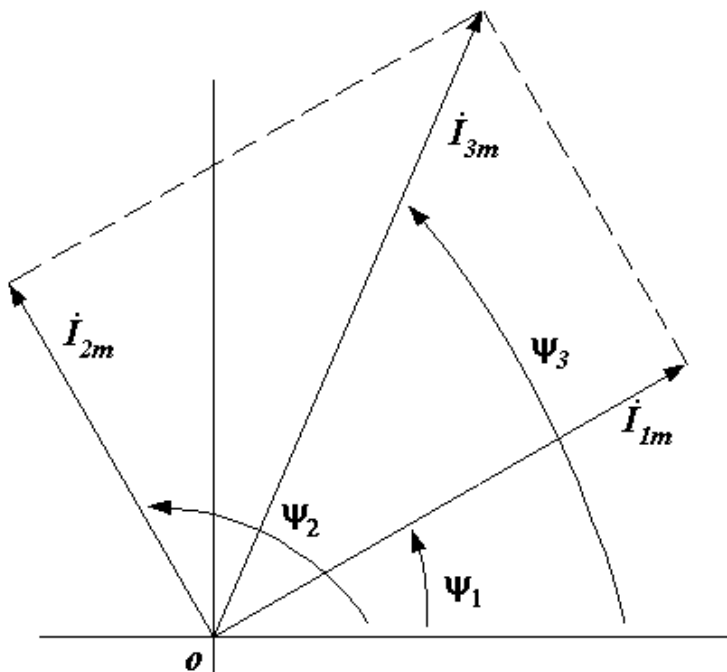


Рис. 2.3. Векторная диаграмма токов [4]

Далее, зная уравнения кривых, изображенных на рис. 2.1, построим векторную диаграмму векторов напряжения и тока. Данную векторную диаграмму приведем на рис. 2.4.

Длины векторов напряжения и тока равняются их действующим значениям в выбранных масштабах. Их начальные фазы являются углами их наклона к оси абсцисс. Угол сдвиг фаз между напряжением и током представляет собой угол между векторами, который, как известно, равен разности их начальных фаз  $\psi_u$  и  $\psi_i$ , и может быть представлен как  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ .

Размерная стрелка, показывающая угол  $\varphi$ , на векторной диаграмме всегда направлена от вектора тока к вектору напряжения. Векторные диаграммы делают наглядным понятие об отставании и опережении по фазе различных электрических величин.

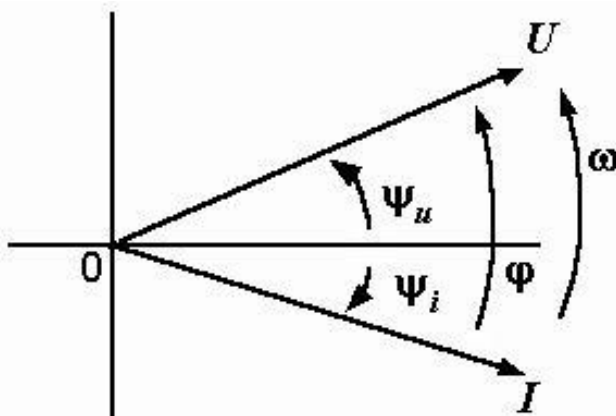


Рис. 2.4. Векторная диаграмма синусоидальных тока и напряжения [4]

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ВРЕМЕНИ КОМПЛЕКСНЫМИ ЧИСЛАМИ

Любую синусоидально изменяющуюся электрическую величину можно изобразить в виде вектора на комплексной плоскости в прямоугольной системе координат или представить комплексным числом. Геометрические операции с векторами можно заменить алгебраическими операциями с комплексными числами, что существенно повышает точность получаемых результатов, так как аналитические методы расчета точнее графоаналитических.

Комплексное число состоит из действительной (вещественной) и мнимой частей. По оси ординат откладывают мнимую часть комплексного числа, и положительное направ-

ление этой оси в электротехнике обозначают  $+j$ , а по оси абсцисс – действительную часть комплексного числа, и положительное направление оси обозначают  $+1$ .

На комплексной плоскости синусоидальная величина может изображаться с использованием модуля и аргумента комплексного числа или в виде двух составляющих (проекций) вектора, направленных по действительной и мнимой осям.

Рассмотрим синусоидальный ток  $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ .

Представим его на комплексной плоскости вектором  $\dot{I}_m$ , модулем которого является значение амплитуды тока  $I_m$ , а аргументом – начальная фаза  $\psi_i$  (рис. 2.5).

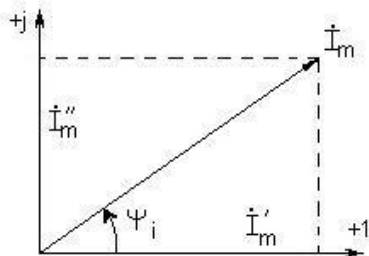


Рис. 2.5 [5]

Проекция вектора  $\dot{I}_m$  на ось действительных чисел будет равна  $I_m'$ , а на ось мнимых чисел –  $I_m''$ , то есть

$$\dot{I}_m = I_m' + jI_m'' = I_m \cdot \cos(\psi_i) + jI_m \cdot \sin(\psi_i). \quad (35)$$

Вектор  $\dot{I}_m$  называют комплексной амплитудой тока.

Обычно при расчётах пользуются действующими значениями.

Каждому вектору на комплексной плоскости, например, вектору тока, соответствует определенное комплексное число, которое может быть записано в формах записи:

- показательной  $\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j\psi_i}$ ,

- тригонометрической  $\dot{I}_m = I_m \cdot \cos(\psi_i) + jI_m \cdot \sin(\psi_i)$ ,
- алгебраической  $\dot{I}_m = I'_m + jI''_m$ .

Тригонометрическая форма записи комплексной величины является переходной от показательной формы к алгебраической.

Для обратного перехода от алгебраической к показательной форме записи необходимо найти модуль этого комплексного числа используя теорему Пифагора (рис. 2.5) и аргумент путем определения тангенса соответствующего угла:

$$I_m = \sqrt{(I'_m)^2 + (I''_m)^2}, \quad (36)$$

$$\psi_i = \arctg \frac{I'_m}{I''_m}. \quad (37)$$

Тогда полностью все формы записи комплексной величины и связь между ними имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_m &= I_m \cdot e^{j\psi_i} = I_m \cdot \cos(\psi_i) + jI_m \cdot \sin(\psi_i) = \\ &= I'_m + jI''_m = \sqrt{(I'_m)^2 + (I''_m)^2} e^{j \arctg \frac{I'_m}{I''_m}}. \end{aligned} \quad (38)$$

## ЛИНЕЙНЫЕ R, L, C ЭЛЕМЕНТЫ В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

### РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Если при воздействии электрического тока выделяется энергия в виде тепла или механической работы, то этот процесс характеризуется таким параметром электрической цепи как активное сопротивление. Количественно параметр «активное сопротивление» может определяться следующим образом. Пусть на некотором участке цепи за время  $T$ , равное периоду переменного синусоидального тока, действующее значение которого равно  $I$ , необратимо преобразуется в тепло или механиче-



скую работу электрическая энергия  $W_T$ . Тогда активное сопротивление рассматриваемого участка цепи по определению равно

$$R = \frac{W_T}{I^2 T}. \quad (39)$$

На электрических схемах замещения активное сопротивление переменному току обозначается точно так же, как и сопротивление  $R$  постоянному току (рис. 2.6), которое, называемое так же омическим сопротивлением определяется структурой кристаллической решетки проводника и состоянием свободных электронов.

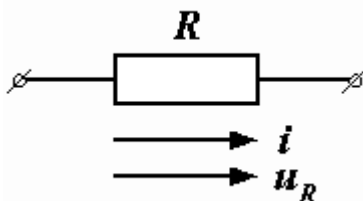


Рис. 2.6. Активное сопротивление [4]

Физическая картина выглядит несколько по-другому на переменном синусоидальном токе. При невысоких частотах сопротивление проводника практически не отличается от сопротивления постоянному току. Но с повышением частоты активно проявляется поверхностный эффект, который состоит в вытеснении переменного тока из объема проводника к его поверхности, что приводит к уменьшению сечения, по которому протекает ток, к увеличению сопротивления и возрастанию тепловых потерь. К аналогичным физической картине приводит эффект близости, выражающийся в неравномерности распределения электрического тока по сечению проводника из-за влияния магнитного поля соседних проводов. Заметим, частота тока в 50 Гц считается низкой, поэтому поверхностный эффект и эффект близости в промышленных и бытовых сетях переменного синусоидального тока практически не проявляется и их, как правило, не учитывают в расчетах.

Если вблизи катушки имеются ферромагнитные или проводящие тела, то магнитное поле переменного тока наводит в них вихревые токи, вызывающие дополнительные потери на нагрев. Так же в переменном магнитном поле происходит непрерывное периодическое перемагничивание ферромагнитного тела, которое сопровождается энергетическими потерями при изменении направления магнитных моментов доменов.

Таким образом, понятие активного сопротивления является более широким, по сравнению с омическим. Числитель в формуле  $R = \frac{W_T}{I^2 T}$  при синусоидальном переменном токе всегда больше, чем на постоянном, так как он включает в себя все перечисленные выше потери электромагнитной энергии. Поэтому активное сопротивление переменному току всегда оказывается больше чем сопротивление постоянному току.

Резистивный элемент как элемент схемы соответствует элементу цепи – резистору с сопротивлением  $R$ , если последний идеализирован, то есть этот элемент учитывает необратимые потери электрической энергии и пренебрегает энергиями электрического и магнитного полей. В дальнейшем будем рассматривать идеализированный резистивный элемент.

Мгновенные значения напряжения и тока в активном сопротивлении связаны законом Ома:

$$u_R(t) = R i(t) = R I_m \sin(\omega t + \psi_i) = U_{Rm} \sin(\omega t + \psi_u). \quad (40)$$

При изменении тока по синусоидальному закону  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  напряжение тоже синусоидально и имеет с током одинаковые начальные фазы  $\psi_u = \psi_i$ . Таким образом, резистор на переменном синусоидальном токе не является фазосдвигающим элементом.

Отсюда амплитудные значения тока и напряжения связаны соотношением

$$U_{Rm} = R I_m. \quad (41)$$

Разделив правую и левую части последнего уравнения на  $\sqrt{2}$ , получим выражение для связи действующих значений напряжения и тока на активном сопротивлении

$$U_R = RI. \quad (42)$$

Два последних уравнения представляют собой различные формы записи закона Ома для активного сопротивления.

По данным уравнениям можно записать комплексные амплитуды тока и напряжения, а также выражения для действующих значений тока и напряжения в комплексной форме записи:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}, \quad \dot{U}_{Rm} = RI_m = RI_m e^{j\psi_i}; \quad (43)$$

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i}, \quad \dot{U}_R = RI = RI e^{j\psi_i}. \quad (44)$$

Получили те же самые выражения закона Ома, но в символической форме.

На рис. 2.7 показаны временная и векторная диаграммы для тока и напряжения резистивного элемента, при построении которых начальная фаза тока и напряжения была принята положительной  $\psi_u = \psi_i = \psi > 0$ .

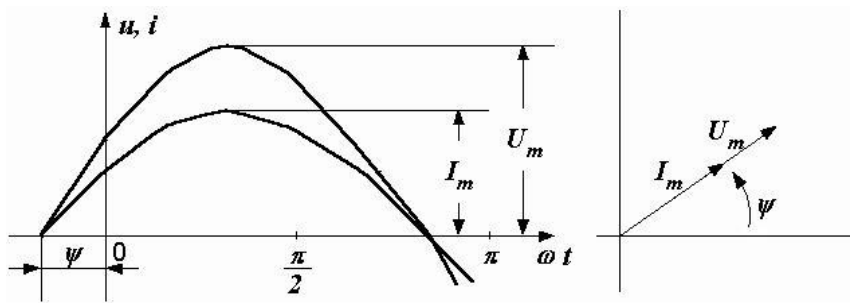


Рис. 2.7. Временная и векторные диаграммы активного сопротивления [4]

В активном сопротивлении напряжение и ток совпадают по фазе; их начальные фазы одинаковы, угол сдвига фаз

равен нулю, векторы на векторной диаграмме направлены в одну сторону (по одной прямой).

## ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Рассмотрим катушку, содержащую  $w$  витков и находящуюся в переменное магнитное поле.

Если в катушке магнитное поле создается собственным током  $i$ , то магнитный поток называется потоком самоиндукции и обозначается  $\Phi_L$ , а наводимая в катушке ЭДС  $e_L$  – ЭДС самоиндукции, которая определяется по следующей формуле

$$e_L = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (45)$$

где  $\Psi$  – потокосцепление самоиндукции, величина, пропорциональная протекающему по катушке току  $\Psi = Li$ .

Коэффициент пропорциональности  $L$  между потокосцеплением и током называется собственной индуктивностью или индуктивностью катушки (контура). Она зависит от формы и размеров катушки, а также от магнитной проницаемости сердечника. Единицами её измерения являются генри (Гн). При рассмотрении линейных цепей полагают  $L = \text{const}$ , тогда выражение для ЭДС самоиндукции примет следующий вид:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (46)$$

Покажем на рис. 2.8 условное обозначение катушки индуктивности на электрической схеме, при этом имеем, что  $u_L$  – напряжение на зажимах катушки, обусловленное электродвижущей силой самоиндукции, таким образом, напряжение, наведенное в катушке собственным переменным магнитным полем.

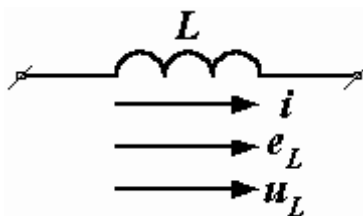


Рис. 2.8. Индуктивный элемент [4]

Три стрелки на схеме, показывающие направления тока  $i$ , ЭДС самоиндукции  $e_L$ , напряжения  $u_L$  принято направлять в одну сторону. Раньше мы видели, что при одинаковых направлениях стрелок напряжения и ЭДС они имеют разные знаки.

Поэтому  $u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$ .

Знак минус в правой части формулы для определения ЭДС самоиндукции  $e_L = -L \frac{di}{dt}$  обусловлен принципом Ленца, который определяет направление индуцированной ЭДС. В данном случае его можно сформулировать следующим образом: ЭДС самоиндукции направлена, таким образом, что своим действием препятствует причине, вызвавшей ее появление.

ЭДС самоиндукции возникает из-за изменения тока. Поэтому когда ток возрастает, она направлена встречно с ним, при уменьшении тока – в одну с ним сторону.

Препятствуя изменению тока, ЭДС самоиндукции оказывает ему сопротивление, которое называется индуктивным и обозначается  $X_L$ . Его величина определяется индуктивностью  $L$  и скоростью изменения тока, т.е. частотой. Формула для определения индуктивного реактивного сопротивления синусоидальному току, имеет вид:

$$X_L = \omega L = 2\pi f. \quad (47)$$

В цепях постоянного тока при постоянных магнитных

полях ЭДС самоиндукции не возникает.

Пусть синусоидальный ток, протекающий по индуктивности, определяется выражением  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ .

Тогда мгновенное значение напряжения на ее зажимах, в соответствии будет равно:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = L \frac{d[I_m \sin(\omega t + \psi_i)]}{dt} = \omega L \cdot I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \quad (48)$$

$$= X_L I_m \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u).$$

Амплитудное значение напряжения будет равно

$$U_{Lm} = \omega L \cdot I_m = X_L \cdot I_m. \quad (49)$$

Аналогичное выражение получается (после деления на  $\sqrt{2}$ ) и для действующего значения напряжения на индуктивном элементе

$$U_L = \omega L \cdot I = X_L \cdot I. \quad (50)$$

Запишем данные формулы в символической форме (комплексной форме):

$$\dot{U}_{Lm} = \omega L I_m e^{j(\psi_i + \pi/2)} = \omega L I_m e^{j\psi_i} e^{j\pi/2} = j\omega L \dot{I}_m = jX_L \dot{I}_m. \quad (51)$$

Аналогично для действующих значений:

$$\dot{U}_L = j\omega L \cdot \dot{I} = jX_L \dot{I}. \quad (52)$$

Тогда индуктивное реактивное сопротивление синусоидальному току имеет следующие формы записи

$$j\omega L = jX_L = X_L e^{j90^\circ} = X_L e^{j\frac{\pi}{2}}.$$

Уравнения, связывающие напряжение и ток в индук-

тивности, как в вещественных, так и в комплексных числах, представляют собой закон Ома для индуктивности. У идеального индуктивного элемента начальная фаза напряжения больше начальной фазы тока на  $90^\circ$  (на  $\frac{\pi}{2}$ ), таким образом, в индуктивности ток отстает от напряжения на четверть периода.

Выражение для закона Ома, записанное в символическое форме, демонстрирует этот сдвиг фаз. Известно, что умножение вектора на  $\mathbf{j}$  приводит к его повороту на угол  $90^\circ$  против часовой стрелки.

На рис. 2.9 показаны временная и векторная диаграммы для тока и напряжения индуктивного элемента, при построении которых начальная фаза тока и напряжения были приняты положительными  $\psi_i > 0$ ,  $\psi_u = \psi_i + 90^\circ > 0$ .

## ЁМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ

Конструкция из двух проводящих тел, разделенных диэлектриком, образует конденсатор. Эти проводящие тела называются обкладками конденсатора. Если к ним подключить источник электрической энергии, то на них будет накапливаться заряд  $q$ , пропорциональный напряжению на конденсаторе  $u_C$ :

$$q = C u_C. \quad (53)$$

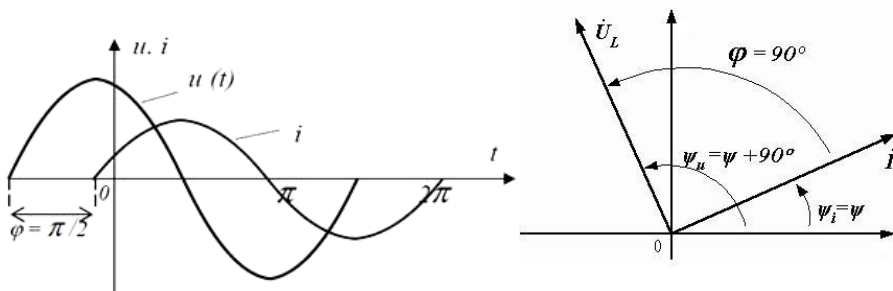


Рис. 2.9. Временная и векторная диаграммы индуктивного элемента

Коэффициент пропорциональности  $C$  между зарядом и напряжением называется ёмкостью конденсатора. Единица измерения ёмкости – фарада (Ф).

Ёмкость зависит от формы, размеров конденсатора и от диэлектрической проницаемости диэлектрика между обкладками. Обозначение ёмкостного элемента на электрических схемах показано на рис. 2.10.

Пусть напряжение, подаваемое источником электрической энергии на конденсатор, изменяется по синусоидальному закону  $u_C(t) = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u)$ . При его увеличении от нуля до максимального значения конденсатор заряжается, на его обкладки от источника поступает электрический заряд. При уменьшении напряжения от максимума до нуля, заряд стекает с конденсатора, он разряжается.

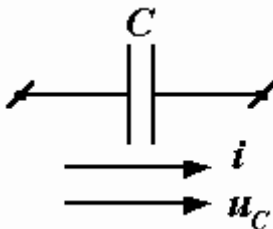


Рис. 2.10. Ёмкостной элемент (конденсатор) [4]

Таким образом, в проводах, соединяющих конденсатор с остальной цепью, постоянно движется электрический заряд, т.е. протекает электрический ток. Величина тока определяется зарядом, прошедшим в единицу времени через поперечное сечение проводника:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu_C)}{dt} = C \frac{du_C}{dt}. \quad (54)$$

Как видим, величина тока зависит от ёмкости и скорости изменения питающего напряжения, т.е. от частоты. От



этих же факторов зависит и электрическая проводимость участка цепи с конденсатором. Ее называют ёмкостной проводимостью и определяют по формуле

$$b_C = \omega C = 2\pi fC. \quad (55)$$

Величина, обратная ёмкостной проводимости, называется ёмкостным реактивным сопротивлением синусоидальному току:

$$X_C = \frac{1}{b_C} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (56)$$

Подставляя в выражение для тока конденсатора выражение для приложенного к конденсатору синусоидального напряжения имеем:

$$\begin{aligned} i(t) &= C\omega U_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u) = \\ &= I_m \sin(\omega t + \psi_u + 90^0) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \end{aligned} \quad (57)$$

где  $I_m = C\omega U_{Cm} = b_C U_{Cm} = \frac{U_{Cm}}{X_C}$  – амплитудное

значение тока на ёмкости;

$\psi_i = \psi_u + 90^0$  – начальная фаза тока на ёмкостном элементе, тогда  $\psi_u = \psi_i - 90^0 = \psi_i - \frac{\pi}{2}$  – начальная фаза напряжения, напряжение на ёмкостном элементе отстает от своего тока на угол  $\pi/2$ . Таким образом, в индуктивности напряжение отстает от тока на четверть периода.

Действующее значение тока имеет вид:

$$I = C\omega U_C = b_C U_C = \frac{U_C}{X_C}. \quad (58)$$

Тогда действующие значение напряжения на ёмкостном

элементе имеет вид:  $U_C = I \frac{1}{\omega C} = X_C I$ .

Последние уравнения представляют разные формы записи закона Ома для конденсатора. Запишем его в символической форме (комплексной форме) для действующих значений:

$$\dot{U}_C = \frac{1}{\omega C} I e^{j(\psi_i - 90^\circ)} = \frac{1}{\omega C} I e^{j\psi_i} e^{-j90^\circ} = -j \frac{1}{\omega C} I e^{j\psi_i} = -j X_C \dot{I}, \quad (59)$$

тогда все формы записи реактивного ёмкостного сопротивления имеют вид:  $-j \frac{1}{\omega C} = -j X_C = X_C e^{-j90^\circ} = X_C e^{-j\frac{\pi}{2}}$ .

На рис. 2.11 показаны временная и векторная диаграммы для тока и напряжения индуктивного элемента, при построении которых начальная фаза тока и напряжения были приняты положительными  $\psi_u > 0$ ,  $\psi_i = \psi_u + 90^\circ > 0$ .

## МГНОВЕННАЯ, АКТИВНАЯ, РЕАКТИВНАЯ И ПОЛНАЯ МОЩНОСТИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Передача электроэнергии  $w$  по электрической цепи (например, по линии электропередачи), потери энергии, то есть преобразование электромагнитной энергии в тепловую, а также в другие виды энергии характеризуются интенсивностью, с которой происходит этот процесс, то есть тем, сколько энергии передается по линии в единицу времени, сколько энергии рассеивается в единицу времени.

Интенсивность передачи или преобразования энергии называется мощностью  $p$ , которая определяется следующим

образом:  $p = \frac{dw}{dt}$ .

Выражение для мгновенного значения мощности в электрических цепях синусоидального тока имеет вид:  $p(t) = i(t)u(t)$ .

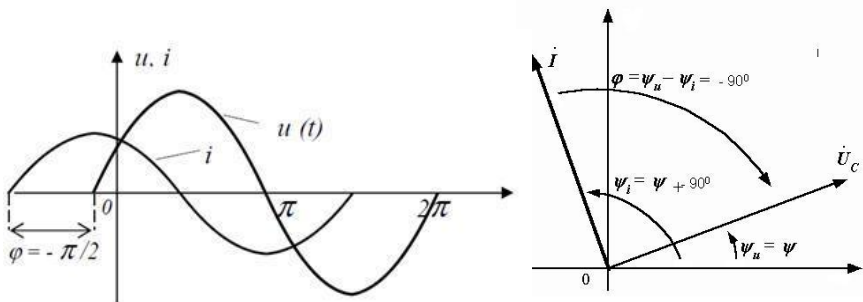


Рис. 2.11. Временная и векторная диаграммы ёмкостного элемента

В общем случае напряжение и ток сдвинуты друг относительно друга на угол  $\varphi$ . Для конкретики приняв начальную фазу напряжения  $\psi_u > 0$ , а начальную фазу тока  $\psi_i = \psi_u - \varphi < 0$ , причем по величине  $\psi_u > \psi_i$ , имеем сдвиг фаз между напряжением и током  $\varphi > 0$ .

Тогда выражение для мгновенной мощности имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= u(t) \cdot i(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \\
 &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) = \\
 &= \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)] = \\
 &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i).
 \end{aligned} \tag{60}$$

Временная диаграмма, иллюстрирующая изменение мгновенных значений тока, напряжения и мощности для указанного выше случая, представлена на рис. 2.12, там же показана векторная диаграмма действующих значений тока и напряжения.

Из выражения для мгновенной мощности следует, что мощность имеет постоянную составляющую  $UI \cos \varphi$  и переменную, изменяющуюся с двойной частотой.

Положительная мощность соответствует поступлению энергии из внешней сети в цепь, а отрицательная – возврату энергии во внешнюю сеть.

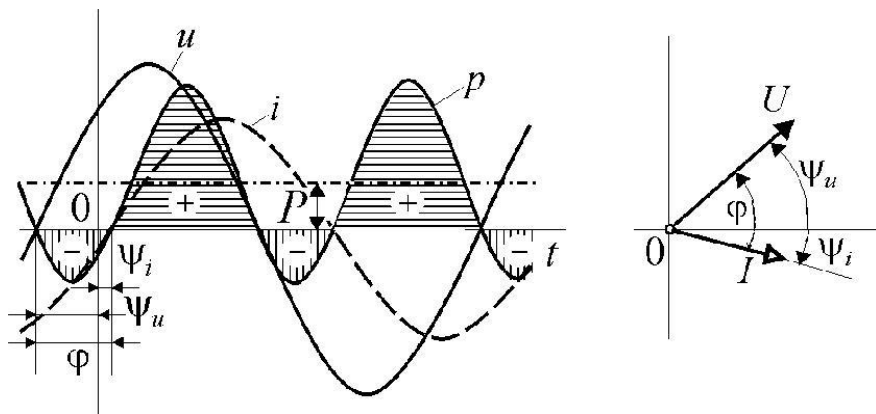


Рис. 2.12 [1]

Так как мощность определяется произведением тока и напряжения, то потребление энергии в цепи происходит в интервалы времени, когда обе величины имеют одинаковый знак (рис. 2.12).

Под активной мощностью  $P$  понимают среднее значение мгновенной мощности  $p(t)$  за период  $T$ :

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt. \quad (61)$$

Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U_m \sin(\omega t + \psi_u) \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i) dt = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi = UI \cos \varphi = RI^2. \end{aligned} \quad (62)$$

Активная мощность физически представляет собой энергию, которая выделяется в единицу времени в виде тепло-

ты на участке цепи с сопротивлением  $R$ . Единица измерения активной мощности – Ватт (Вт).

Под реактивной мощностью  $Q$  понимают произведение напряжения на участке цепи на ток, протекающий по этому участку, и на синус угла  $\varphi$  между напряжением и током:

$$Q = UI \sin \varphi = XI^2. \quad (63)$$

Единица измерения реактивной мощности – вольт-ампер реактивный (ВАр).

Величина, объединяющая активные реактивные мощности, называется полной мощностью:

$$S = UI. \quad (64)$$

Единица измерения полной мощности – вольт-ампер (ВА).

Полная мощность не имеет физического смысла, но её можно определить как максимально возможную активную мощность, т.е. активную мощность при  $\cos \varphi = 1$ .

Для того, чтобы вычислить полную мощность нужно комплекс напряжения умножить на сопряженный комплекс тока:

$$\tilde{S} = \tilde{U} \cdot \tilde{I}^* \quad (65)$$

Можно расписать

$$S = UI e^{j(\psi_u - \psi_i)} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ. \quad (66)$$

Таким образом, активная мощность  $P$  является действительной частью ( $\text{Re}$ ), а реактивная  $Q$  представляет собой мнимую часть ( $\text{Im}$ ) полной мощности.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ R, L, C ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Пусть по участку электрической цепи с последовательно соединенными резистивным, индуктивным и ёмкостным элементами протекает синусоидальный ток, и известны его мгновенное значение  $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$  и численные значения параметров  $R, L, C$  (рис. 2.13, а).

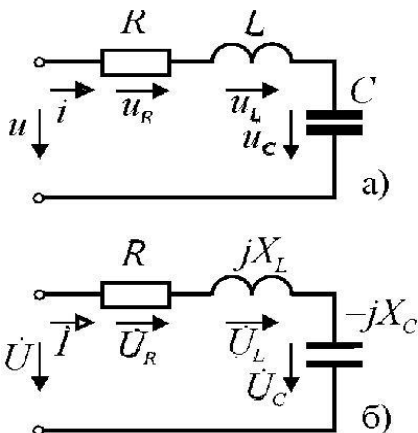


Рис. 2.13 [1]

Необходимо определить выражение для мгновенного значения напряжения на этом участке.

Сначала запишем для этого участка цепи уравнение по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений напряжений на пассивных  $R, L, C$  элементов:  
 $u(t) = u_R(t) + u_L(t) + u_C(t).$

В интегрально-дифференциальной форме записи оно примет вид:

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt. \quad (67)$$

Изобразим синусоидальные напряжения с помощью комплексных величин (рис. 2.13, б). Тогда при переходе к действующим комплексным значениям напряжений справедливо выражение:

$$\begin{aligned}
 \dot{U} &= \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R\dot{I} + j\omega L \cdot \dot{I} + (-j\frac{1}{\omega C})\dot{I} \\
 &= [R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})] \cdot \dot{I} = [R + jX_L - jX_C] \cdot \dot{I} = \\
 &= [R + j(X_L - X_C)] \cdot \dot{I} = Z\dot{I},
 \end{aligned} \tag{68}$$

где  $Z = R + jX_L + (-jX_C) = R + j(X_L - X_C)$  – комплексное сопротивление цепи с последовательным соединением элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементов.

Очевидно, что при последовательном соединении в цепях синусоидального тока комплексные сопротивления отдельных участков цепи складываются так же, как и в цепях постоянного тока, но с учетом их характера.

Комплексное действующее значение напряжения на всем участке имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} e^{j\varphi} \cdot I e^{j\psi_i} &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j\varphi} \cdot I e^{j\psi_i} = \\
 = U e^{j\psi_u},
 \end{aligned} \tag{69}$$

$$\text{где } U = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \cdot I = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \cdot I \quad -$$

действующее значение напряжения на всем участке;

$\psi_u = \psi_i + \varphi$  – начальная фаза напряжения на всем участке;

$\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением на всем участке и током.

Амплитудные значения тока и напряжения в  $\sqrt{2}$  больше действующих, поэтому выражение для амплитудного значения напряжения на всем участке имеет вид:

$$U_m = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \cdot I_m = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \cdot I_m. \tag{70}$$

Тогда искомое выражение для мгновенного значения напряжения на всем участке имеет вид:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi).$$

Представим комплексное сопротивление в символической форме (комплексной форме):

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \cdot e^{j\varphi} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j\varphi} = z e^{j\varphi}, \quad (71)$$

$$\text{где } z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} - \text{модуль}$$

комплексного сопротивления, который называют полным сопротивлением цепи с последовательным соединением элементов R, L, C элементов;

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} - \text{аргумент}$$

комплексного сопротивления является углом сдвига фаз между напряжением и током на данном участке цепи.

Сдвиг фаз определяется соотношением реактивных и активных параметров сопротивлений, включенных на участке цепи.

Возможны три ситуации соотношения реактивных и активных параметров:

1) если  $\omega L > 1/\omega C$ ,  $X_L > X_C$ , то угол  $\varphi > 0$ , ток отстает по фазе от напряжения или напряжение опережает ток по фазе, в данном случае цепь имеет активно-индуктивный характер;

2) если  $\omega L < 1/\omega C$ ,  $X_L < X_C$ , то угол  $\varphi < 0$ , ток опережает напряжение по фазе или напряжение отстает от тока по фазе, в данном случае цепь имеет активно-ёмкостной характер;

3) если  $\omega L = 1/\omega C$ ,  $X_L = X_C$ , то угол  $\varphi = 0$ , ток совпадает по фазе с напряжением и цепь ведет себя как чисто активное сопротивление (характер цепи чисто активный). Такой режим работы цепи называют режимом резонанса напряжений.



Выше были рассмотрены характеры напряжений на резисторе, конденсаторе и катушке. И было отмечено, что на сопротивлении ток и напряжение по фазе совпадают, на индуктивности напряжение опережает ток на  $90^\circ$ , а на ёмкости напряжение отстает от тока на  $90^\circ$ , то есть должно быть повернуто относительно вектора тока на угол  $90^\circ$  в отрицательном направлении (а на индуктивности в положительном). Это обстоятельство будем учитывать при построении векторных диаграмм на комплексной плоскости. В соответствии с тремя возможными ситуациями соотношения между реактивными сопротивлениями  $X_L$  и  $X_C$ , рассмотренными выше, построим три векторные диаграммы для каждого из случаев (рис. 2.14, а, б, в).

При построении векторных диаграмм для простоты принимаем начальную фазу тока равной нулю  $\psi_i=0$ .

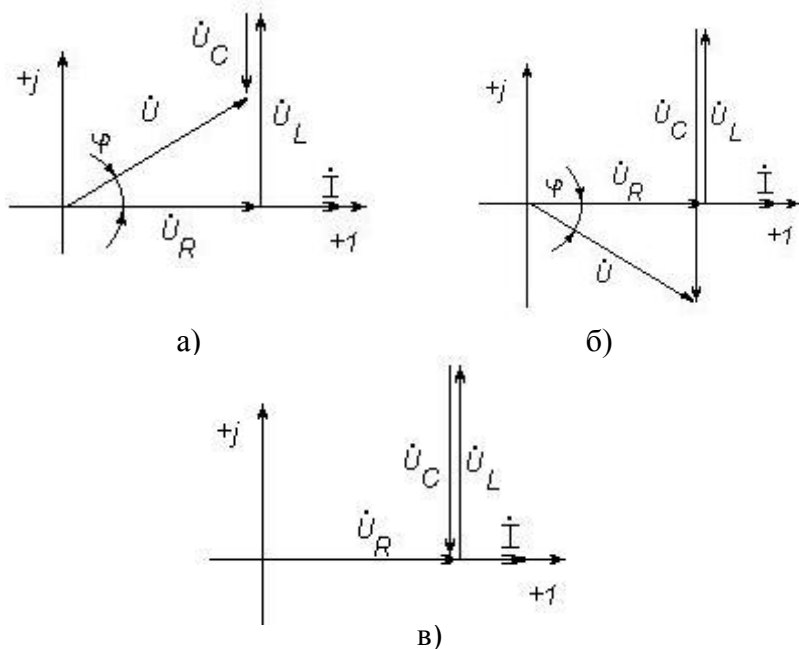


Рис. 2.14. Векторные диаграммы для разных соотношений реактивных параметров [5]

## ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ R, L, C ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

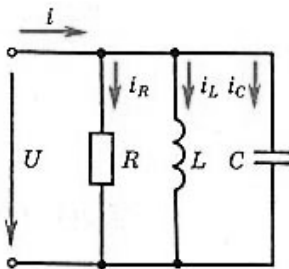


Рис. 2.15 [1]

Пусть к участку электрической цепи с параллельным соединенными резистивным, индуктивным и ёмкостным элементами приложено синусоидальное напряжение, и известны его мгновенное значение  $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$  и численные значения параметров  $R, L, C$  (рис. 2.13, а).

Необходимо определить выражение для мгновенного значения суммарного тока на этом участке.

Сначала запишем для этого участка цепи уравнение по первому закону Кирхгофа для мгновенных значений напряжений  $R, L, C$  элементов:

$$i(t) = i_R(t) + i_L(t) + i_C(t), \quad (72)$$

в интегрально-дифференциальной форме записи оно примет вид:  $i(t) = \frac{u(t)}{R} + \frac{1}{L} \int u(t) dt + C \frac{du(t)}{dt}$ .

Изобразим синусоидальные токи с помощью комплексных величин, тогда при переходе к действующим комплексным значениям токов справедливо выражение:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = \frac{\dot{U}}{R} + \frac{\dot{U}}{j\omega L} + \frac{\dot{U}}{-j/\omega C} = \\ &= \left[ \frac{1}{R} + j\left(-\frac{1}{\omega L} + \omega C\right) \right] \cdot \dot{U} = [g - j(b_L - b_C)] \cdot \dot{U} = Y\dot{U}, \end{aligned} \quad (73)$$

где  $Y = \left[ \frac{1}{R} - j\left(+\frac{1}{\omega L} - \omega C\right) \right] = g - j(b_L - b_C)$  — ком-

плексная проводимостью цепи с параллельным соединением элементов  $R, L, C$ , которая определяется как сумма проводимостей параллельных ветвей;

$g = \frac{1}{R}$  – активная составляющая проводимости;

$b_L = \frac{1}{\omega L}$  – реактивная индуктивная составляющая проводимости;

$b_C = \omega C$  – реактивная емкостная составляющая проводимости.

Комплексное действующее значение суммарного тока на всем участке имеет вид:

$$\dot{I} = Y\dot{U} = ye^{j\psi_u} Ue^{j\psi_u} = yU \cdot e^{j(\psi_u - \varphi)} = Ie^{j\psi_i}, \quad (74)$$

где  $I = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} \cdot U = yU$  – действующее значение суммарного тока;

$\psi_i = \psi_u - \varphi$  – начальная фаза суммарного тока;

Амплитудные значения тока и напряжения в  $\sqrt{2}$  больше действующих, поэтому выражение для амплитудного значения суммарного тока на всем участке имеет вид:

$$I_m = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} \cdot U_m = yU_m. \quad (75)$$

Тогда искомое выражение для мгновенного значения суммарного тока на всем участке имеет вид:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} \cdot U_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi). \quad (76)$$

Запишем комплексную проводимость с параллельным соединением элементов R, L, C в показательной форме:

$$Y = g - j(b_L - b_C) = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} e^{j \arctg \frac{-(b_L - b_C)}{g}} = ye^{-j\varphi}, \quad (77)$$

где  $y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}$  – модуль комплексной проводимости, который называют полной проводимостью цепи с последовательным соединением элементов R, L, C элементов;

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g} = \arctg \frac{1/\omega L - \omega C}{1/R} \quad - \text{ угол сдвига фаз}$$

между напряжением, поданным на вход участка цепи и суммарным током, который определяется соотношением активной и реактивной проводимостей.

Построим векторную диаграмму токов и напряжения (рис. 2.16) приложенного к данному участку цепи, приняв начальную фазу напряжения, для простоты, за ноль  $\psi_u = 0$ .

При построение диаграммы примем, что  $b_L > b_C$ .

При построение векторной диаграммы будем учитывать, что ток активного элемента совпадает по фазе с напряжением, поэтому вектор этого тока изображается параллельно вектору напряжения; ток идеального индуктивного элемента отстает от напряжения на  $90^\circ$ , поэтому вектор этого ток повернут относительно вектора напряжения на  $90^\circ$  по часовой стрелке; ток ёмкостного элемента опережает напряжение на  $90^\circ$ , поэтому вектор этого тока повернут относительно вектора напряжения против часовой стрелки на  $90^\circ$ .

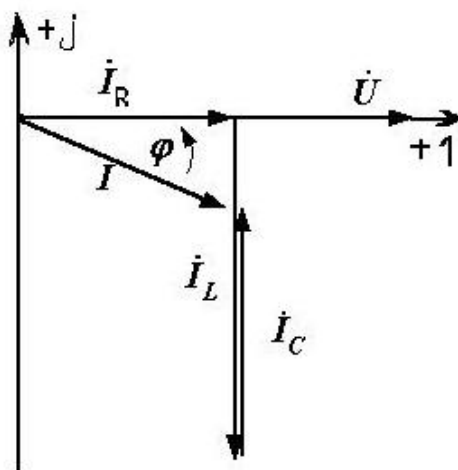


Рис. 2.16 [4]

Сдвиг фаз определяется соотношением реактивных и

активных параметров сопротивлений, включенных на участке цепи.

Возможны три ситуации соотношения реактивных и активных:

1) если  $1/\omega L > \omega C$  или  $b_L > b_C$  угол  $\varphi > 0$ , ток отстает по фазе от напряжения или напряжение опережает ток, в данном случае цепь имеет активно-индуктивный характер;

2) если  $1/\omega L < \omega C$  или  $b_L < b_C$  угол  $\varphi < 0$ , ток опережает по фазе напряжение или напряжение отстает по фазе от тока, в данном случае цепь имеет активно-ёмкостной характер;

3) если  $1/\omega L = \omega C$  или  $b_L = b_C$  угол  $\varphi = 0$ , ток совпадает по фазе с напряжением и цепь ведет себя как чисто активное сопротивление; такой режим работы цепи называется режимом резонанса токов.

## **РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**

Резонансом называется режим работы приемника (потребителя) электрической энергии, имеющего индуктивные и ёмкостные элементы в своем составе, при котором его полное реактивное сопротивление равно нулю. Таким образом, при резонансе ток и напряжение на входе приемника (потребителя) совпадают по фазе. Явление резонанса иногда используется в электро- и радиотехнике, но оно может приводить к нежелательным эффектам, которые могут служить причиной поломки технического оборудования.

## **РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ**

При последовательном соединении реальной катушки индуктивности и конденсатора схеме замещения имеет вид последовательно соединенных идеализированных резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов (рис. 2.13).

Резистивный элемент цепи соответствует активному сопротивлению реальной катушки.

Условием возникновения резонанса в такой цепи является:

$$X_L = X_C, \quad \omega L = 1/\omega C, \quad 2\pi fL = 1/2\pi fC. \quad (78)$$

Рассмотрим некоторые характерные особенности резонанса напряжений.

В этом случае, находящиеся в противофазе, напряжения на индуктивном и ёмкостном элементах равны  $U_L = U_C$ , и компенсируют влияние друг друга, что показано на векторной диаграмме на рис. 2. 14, в).

Полное сопротивление последовательного контура, схема замещения, которого показана на рис. 2.13, при резонансе напряжений минимально и равно активному сопротивлению цепи:

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R. \quad (79)$$

Из выражения для тока в цепи, записанного по закону Ома  $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$  следует, что в режиме резонанса

ток максимален и, ввиду чисто активного характера сопротивления цепи, совпадает по фазе с приложенным напряжением:

$$I_{\text{рез}} = I_{\text{max}} = \frac{U}{R}, \quad U = I_{\text{рез}} \cdot R = U_R. \quad (80)$$

По максимуму тока можно выявить режим резонанса и это используется в технике при настройке резонансных контуров, но возрастание тока может быть опасно для оборудова-

ния, в котором возникает резонанс напряжений.

Как отмечалось выше, при резонансе напряжения на индуктивности и на емкости равны и в  $Q$  раз превышают приложенное напряжение:

$$\frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U} = Q, \quad (81)$$

где  $Q$  – добротностью контура, величина, которая показывает во сколько раз напряжение на реактивном (индуктивном или ёмкостном) элементе превышает напряжение на входе схемы в резонансном режиме.

Эффект усиления напряжения в резонансном контуре широко используется в радиотехнике и автоматике, но в силовых электроэнергетических установках и сетях он крайне нежелателен, потому что может вызывать опасные перенапряжения.

В радиотехнических устройствах  $Q$  может достигать 300 и более.

Из выражения являющимся условием резонанса можно определить угловую частоту, при которой возникает этот режим. Такую частоту называют резонансной угловой частотой:  $\omega_{\text{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ .

Линейная частота, при которой возникает режим резонанса, называют линейной резонансной частотой.

$$f_{\text{рез}} = f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}. \quad (82)$$

Для добротности контура можно записать такое соотношение:

$$Q = \frac{U_L}{U_R} = \frac{U_C}{U_R} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{\rho}{R}, \quad (83)$$

где  $\rho$  – волновое (характеристическое) сопротивление контура:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \omega_{\text{рез}} \cdot L = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} \cdot C} = Q \cdot R. \quad (84)$$

Рассмотрим частотные характеристики последовательного соединенных индуктивного и ёмкостного элементов. Они представляют собой характер изменения ёмкостного и индуктивного сопротивлений при изменении частоты питающего напряжения.

Ёмкостное сопротивление  $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$  при увеличении частоты  $\omega$  уменьшается от бесконечности до нуля по закону обратной пропорциональности.

Индуктивное сопротивление  $X_L = \omega \cdot L$  при увеличении частоты  $\omega$  увеличивается от нуля до бесконечности прямо пропорционально  $\omega$ .

Как видно из рис. 2.17, а при увеличении частоты от 0 до  $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$  реактивное сопротивление всего рассматриваемого контура  $X = X_L - X_C$  имеет ёмкостной характер и изменяется от  $-\infty$  до 0. Вследствие этого ток в цепи возрастает от 0 до  $I_{\text{max}}$ , а угол сдвига фаз  $\phi$  между напряжением и током изменяется от  $-\frac{\pi}{2}$  до 0. При дальнейшем увеличении частоты от  $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$  до  $\infty$  происходит увеличение реактивного сопротивления  $X$  от 0 до  $\infty$ , которое будет иметь индуктивный характер.



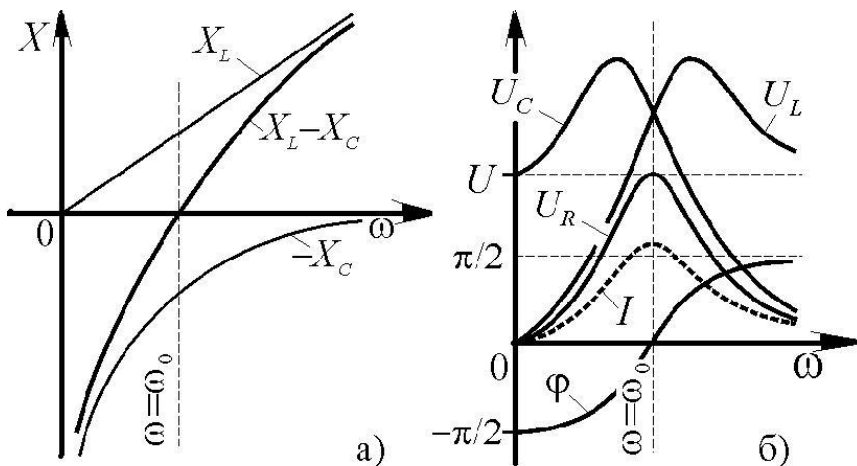


Рис. 2.17 [1]

В результате ток уменьшается от  $I_{\max}$  до 0, а угол  $\varphi$  возрастает от 0 до  $\frac{\pi}{2}$ . При этом напряжение  $U_R = R \cdot I$  изменяется пропорционально току.

Напряжение на индуктивном элементе определяется по закону Ома  $U_L = \omega L I$  и вид её графической зависимости от частоты повторяет форму кривой зависимости тока  $I(\omega)$ .

При  $\omega=0$  напряжение на ёмкостном элементе равно приложенному к контуру напряжению  $U$ . При такой частоте  $X_C = \infty$ , тогда ток в цепи не протекает и все напряжение на входе контур будет приложено к месту разрыва, то есть к обкладкам ёмкостного элемента.

При  $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$  напряжение на ёмкостном элементе равно напряжению на индуктивном элементе. При  $\omega \rightarrow \infty$  напряжение ёмкостного элемента уменьшается до нуля.

К частотным характеристикам относятся и зависимости от частоты токов и напряжений в цепи при последовательном

соединении реактивных индуктивного и ёмкостного элементов. Такие характеристики являются резонансными кривыми. Зависимости, показывающие изменение напряжений, тока и угла сдвига фаз при изменении одной из величин ( $f$ ,  $L$ ,  $C$ ), которое сопровождается возникновением явления резонанса, называются резонансными характеристиками или кривыми. Представим резонансные кривые при изменении частоты питающего напряжения на рис. 2.17, б).

Кроме показанного выше максимума тока в точке резонанса, из резонансных кривых видно, что напряжения на индуктивном и ёмкостном элементах имеют максимумы одинаковые по значению, но смещённые относительно частоты резонанса. Максимум напряжения ёмкостного элемента смещён в сторону меньших частот относительно резонансной, а максимум напряжения на индуктивном – в сторону больших частот. Значение максимумов и их смещение зависят от добротности контура, с возрастанием которой максимальные значения увеличиваются, а частоты, на которых они проявляются, стремятся к частоте резонанса. Добротность влияет также на максимум и крутизну резонансной кривой тока, с увеличением которой максимум и крутизна кривой тока увеличиваются.

## **РЕЗОНАНС ТОКОВ**

При параллельном соединении идеальной катушки индуктивности, резистора и конденсатора схеме замещения имеет вид, представленный на рис. 2.15.

Рассмотрим некоторые характерные особенности резонанса тока, возникающего в такой цепи.

Векторная диаграмма, построенная для данной цепи, приведена на рис. 2.16. С вектором напряжения, приложенного к зажимам цепи, совпадает по направлению вектор тока, протекающий через резистивный элемент. Его величина является

активной составляющей полного тока цепи и равна  $I_a = I_R = \frac{U}{R}$ .

Вектор тока индуктивного элемента, величина которого равна  $I_L = U/\omega L$ , отстает от вектора напряжения на  $90^\circ$ , а вектор тока через ёмкость опережает его на  $90^\circ$ . Проведем последовательное суммирование векторов  $\dot{I}_R$ ,  $\dot{I}_L$ ,  $\dot{I}_C$ . Результатом сложения является вектор полного тока на входе цепи. Он сдвинут по фазе относительно вектора на угол  $\varphi$ . Разность векторов  $\dot{I}_L - \dot{I}_C$  дает вектор реактивной составляющей полного тока  $I_p$ , величина которого определяется следующим образом:

$$I_p = U\omega C - \frac{U}{\omega L} = U\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right). \quad (85)$$

Векторы  $\dot{I}_a$ ,  $\dot{I}_p$ ,  $\dot{I}_C$  образуют прямоугольный треугольник токов. Для этого треугольника справедливы следующие соотношения:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = U \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2} = U \sqrt{g^2 + b^2}; \quad (86)$$

$$\varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a} = \arctg \frac{\frac{1}{\omega L} - \omega C}{\frac{1}{R}} = \arctg \frac{b}{g}. \quad (87)$$

Треугольник токов наглядно показывает, что для достижения резонанса в цепи необходимо обеспечить равенства  $I_L$  и  $I_C$ , лежащих в противофазе. Тогда результирующий реактивный ток цепи  $I_p$  и угол  $\varphi$  будут равны нулю, а входное сопротивление цепи станет чисто активным. Тогда условием возникновения резонанса в такой

цепи является:

$$b_C = b_L, \quad \omega C = 1/\omega L, \quad 2\pi f C = 1/2\pi f L. \quad (88)$$

Тогда выражение для резонансной частоты при заданных значениях элементов  $L$  и  $C$  имеет вид:

$$\omega_{\text{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (89)$$

Действующее значение полного тока всей цепи  $I = I_{\text{рез}}$  при частоте  $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$  определяется следующим образом:

$$I = I_{\text{рез}} = \frac{U}{R}. \quad (90)$$

Но это значение равно току, протекающему через активное сопротивление цепи  $I_R$ , таким образом  $I = I_{\text{рез}} = I_a = I_R$ .

Ток индуктивного элемента  $L$ , в режиме резонанса, определим по закону Ома

$$I_{L\text{рез}} = U \cdot Y_L = \frac{U}{\omega_0 L} = \frac{U}{\omega_{\text{рез}} L} = \frac{R}{\omega_{\text{рез}} L} I_{\text{рез}}. \quad (91)$$

Аналогично определяем выражение для тока ёмкостного элемент в режиме резонанса  $I_{C\text{рез}} = R\omega_{\text{рез}} C I_{\text{рез}}$ .

Токи, протекающие через индуктивный и ёмкостной элементы равны по величине, но противоположны по направлению. Величина добротности  $Q$  равна

$$Q = \frac{R}{\omega_{\text{рез}} L} = R\omega_{\text{рез}} C. \quad (92)$$

Она может быть больше единицы, но специальных устройствах достигает несколько десятков и сотен единиц.

В режиме резонанса токи, протекающие в ветвях реактивных элементов, могут достигать значений в десятки и сотни раз больше общего тока цепи. Поэтому резонанс цепи называют резонансом токов. Эти токи лежат в противофазе, поэтому в цепи происходит колебательный процесс с частотой

$\omega_{\text{рез}} = \omega_0$  по передаче электрической энергии конденсатора в магнитную энергию индуктивности и наоборот. Энергия источника на этот процесс не затрачивается (при идеальных  $L$  и  $C$ ). Она расходуется только на преодоление сопротивления резистора  $R$ . Поэтому цепь на рис. 2.15 называют параллельным колебательным контуром.

Представим резонансные кривые для режима резонанса токов при изменении частоты питающего напряжения на рис. 2.18.

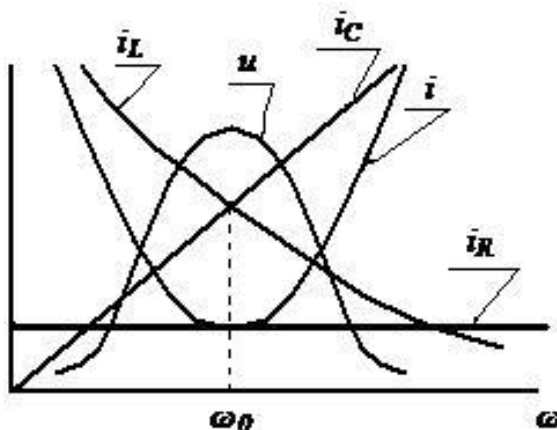


Рис. 2.18

Ток, протекающий через резистивный элемент  $R$ , определяется по закону Ома и не зависит от частоты, поэтому его зависимость представляет собой прямую параллельную оси  $\omega$ . Ток ёмкостного элемента прямо пропорционален частоте  $\omega$ , а ток индуктивного элемента – обратно пропорционален  $\omega$ . При резонансной частоте они равны по величине, но лежат в противофазе. Общий ток цепи определяется суммой токов в параллельных ветвях по первому закону Кирхгофа, поэтому он имеет большую величину при частотах, расположенных дальше от резонансной по оси  $\omega$ , и принимает значение тока на резисторе при резонансной частоте. Физически это означает, что на резонансной частоте проводимость цепи минимальна (она

равна проводимости резистивного элемента  $R$ ).

## **ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ**

1. Повторить разделы курса «Электротехника и электроника», в которых рассматриваются режимы работы однофазных цепей синусоидального тока при последовательном и параллельном соединении приемников, а также режимы резонанса напряжения и тока.

2. Повторить разделы курса «Электротехника и электроника», в которых рассматривается расчет однофазных цепей синусоидального тока при смешанном соединении приемников, построение векторных.

## **ПРОГРАММА РАБОТЫ**

Объектом исследования является линейная цепь однофазного синусоидального тока. Цепь подключается к лабораторному трансформатору (ЛАТРу), первичная обмотка которого включается в сеть с напряжением 220 В, а вторичная обмотка при изменении числа её витков позволяет регулировать напряжение на входе исследуемой цепи в пределах от 0 до 250 В.

В качестве приемников (потребителей) исследуются катушка индуктивности с параметрами  $R_K$ ,  $L_K$  и батарея конденсаторов, ёмкость которой изменяется в пределах от 0 до 34,75 мкФ, а так же; конденсаторы с ёмкостью  $C_1=30$  мкФ,  $C_2=20$  мкФ,  $C_3=10$  мкФ; резисторы с сопротивлениями  $R_1=30$  Ом,  $R_2=100$  Ом,  $R_3=150$  Ом.

1. Определение параметров индуктивности  $R_K$ ,  $L_K$ :

а) собрать цепь лабораторной установки (рис. 2.19);

б) исключить из цепи ёмкостный элемент, для чего замкнуть накоротко клеммы батареи конденсаторов;

в) при двух значениях входного напряжения 80 и 100 В, устанавливаемых с помощью ЛАТРа, измерить ток в цепи и угол сдвига фаз между напряжением на зажимах катушки и

током.

Измеренные значения занести в табл. 2.2.

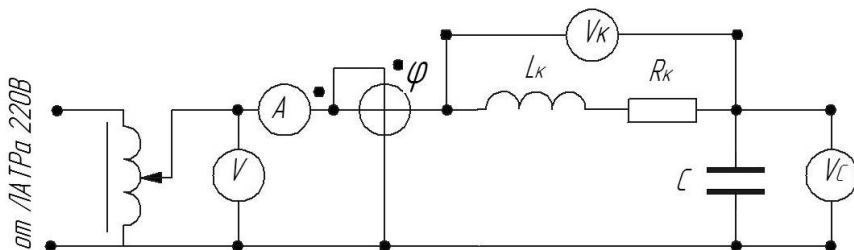


Рис. 2.19

Таблица 2.2

| Измерено                              |      |                    | Вычислено  |            |       |
|---------------------------------------|------|--------------------|------------|------------|-------|
| U, В                                  | I, А | $\varphi_K$ , град | $R_K$ , Ом | $X_K$ , Ом | L, Гн |
| 80 В                                  |      |                    |            |            |       |
| 100 В                                 |      |                    |            |            |       |
| Среднее значение определяемых величин |      |                    |            |            |       |

г) по результатам измерений вычислить активное  $R_K$  и индуктивное  $X_K$  сопротивления катушки, а также ее индуктивность L. Данные расчетов занести в табл. 2.2.

2. Исследование влияния переменной ёмкости на свойства цепи с последовательным соединением катушки и конденсатора:

а) рассчитать значение резонансной емкости, используя значение индуктивности катушки из табл. 2.1;

б) убрать провод, соединяющий клеммы батареи конденсаторов;

в) установить на входе цепи напряжение 80 В и далее поддерживать его неизменным;

г) изменяя емкость батареи конденсаторов, произвести 7 измерений величин, указанных в табл. 2.3, из них 3 опыта проводят при ёмкости меньше резонансной, 3 опыта при ёмкости больше резонансной, и особо необходимо отметить режим,

наиболее близкий к резонансному; данные измерений занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

| Номер опыта | Измерено |           |         |                       |                       |            | Вычислено |          |                        |                       |
|-------------|----------|-----------|---------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|----------|------------------------|-----------------------|
|             | U,<br>В  | C,<br>мкФ | I,<br>А | U <sub>к</sub> ,<br>В | U <sub>с</sub> ,<br>В | φ,<br>град | z,<br>Ом  | X,<br>Ом | X <sub>с</sub> ,<br>Ом | U <sub>л</sub> ,<br>В |
| 1           | 80 В     |           |         |                       |                       |            |           |          |                        |                       |
| 2           |          |           |         |                       |                       |            |           |          |                        |                       |
| 3           |          |           |         |                       |                       |            |           |          |                        |                       |
| 4           |          |           |         |                       |                       |            |           |          |                        |                       |
| 5           |          |           |         |                       |                       |            |           |          |                        |                       |
| 6           |          |           |         |                       |                       |            |           |          |                        |                       |
| 7           |          |           |         |                       |                       |            |           |          |                        |                       |

Наиболее целесообразно выполнять исследования следующим образом (см. п.2, г):

- изменяя емкость батареи конденсаторов вблизи рассчитанной величины  $C_{рез}$ , подобрать такое значение ёмкости, при котором в цепи наступит резонанс напряжений, то есть угол сдвига фаз, измеряемый фазометром, будет равен или близкий к нулю; измерить ток и напряжения на катушке и конденсаторе для этого режима;

- далее выполнить три опыта при емкости меньше резонансной, и три опыта – больше резонансной; шаг изменения емкости батареи конденсаторов принять 2-4 мкФ.

3. Исследование влияния переменной емкости на свойства цепи с параллельным соединением катушки и конденсатора:

а) собрать цепь лабораторной установки рис. 2.20 с параллельным соединением катушки и конденсатора;

б) рассчитать значение резонансной емкости, используя значение индуктивности катушки из табл. 2.1;



в) установить на входе цепи напряжение 80 В и далее поддерживать его неизменным;

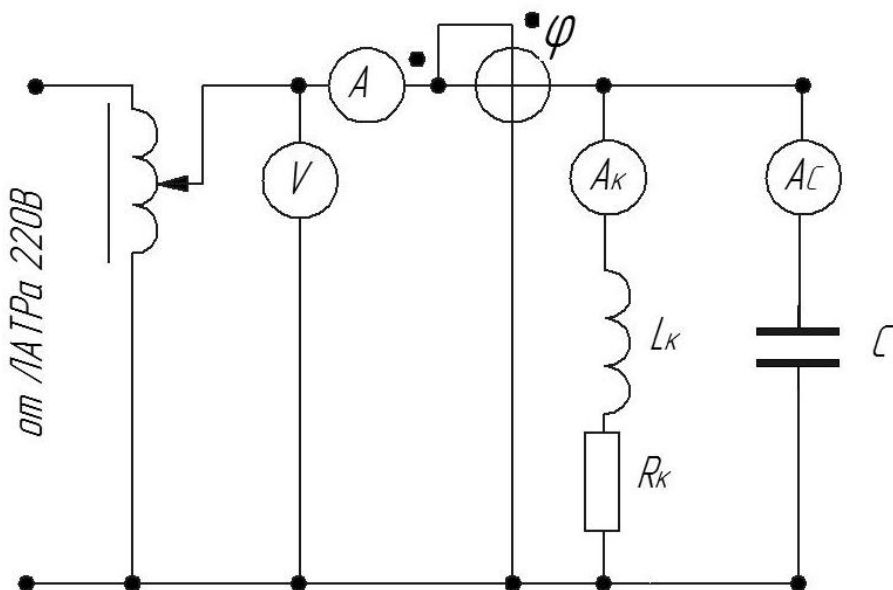


Рис. 2.20

г) изменяя емкость батареи конденсаторов, произвести 7 измерений величин, указанных в табл. 2.4, из них 3 опыта проводят при ёмкости меньше резонансной, 3 опыта при ёмкости больше резонансной, и особо необходимо отметить режим, наиболее близкий к резонансному; данные измерений занести в табл. 2.4.

Порядок проведения опытов сохранять таким же, как и при выполнении эксперимента (по п. 2, г).

#### 4. Построение резонансных кривых.

Для исследуемой схемы (рис. 2.19) по данным табл. 2.2 построить на миллиметровой бумаге на одном графике зависимости  $I(C)$ ,  $U_L(C)$ ,  $U_C(C)$ ,  $\varphi(C)$ .

5. Для исследуемой схемы (рис. 2.20) по данным табл. 2.3 построить на миллиметровой бумаге на одном графике зависимости  $I(C)$ ,  $I_L(C)$ ,  $I_C(C)$ ,  $\varphi(C)$ .

Таблица 2.4

| Номер опыта | Измерено |        |      |           |           |                  | Вычислено |
|-------------|----------|--------|------|-----------|-----------|------------------|-----------|
|             | U, В     | C, мкФ | I, А | $I_K$ , А | $I_C$ , А | $\varphi$ , град | C, мкФ    |
| 1           | 80 В     |        |      |           |           |                  |           |
| 2           |          |        |      |           |           |                  |           |
| 3           |          |        |      |           |           |                  |           |
| 4           |          |        |      |           |           |                  |           |
| 5           |          |        |      |           |           |                  |           |
| 6           |          |        |      |           |           |                  |           |
| 7           |          |        |      |           |           |                  |           |

6. Построение векторных диаграмм:

а) по данным табл. 2.2 построить векторные диаграммы токов и напряжений для трех режимов:  $X_L > X_C$ ,  $X_L = X_C$ ,  $X_L < X_C$ .

б) по данным табл. 2.3 построить векторные диаграммы токов и напряжений для трех режимов:  $b_L > b_C$ ,  $b_L = b_C$ ,  $b_L < b_C$ .

7. Собрать цепь по схеме рис. 2.21, используя элементы  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  состав и размерность которых необходимо выбирать согласно варианту, который нужно уточнить у преподавателя.

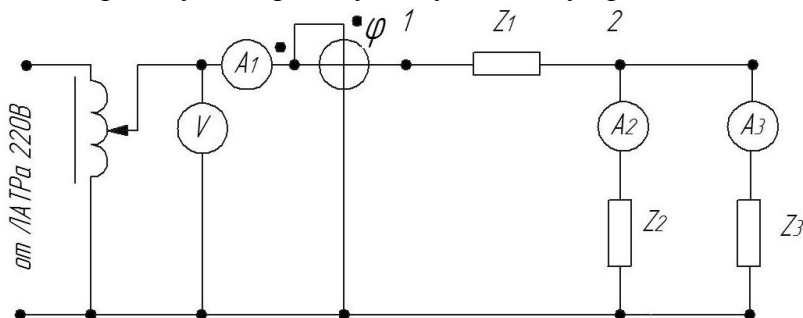


Рис. 2.21

8. Измерить токи в ветвях и напряжения на всех участках цепи для значения напряжения питания  $U=100\text{ В}$ ; показания приборов записать в табл. 2.5.

Таблица 2.5

| $I_1$ ,<br>А | $I_2$ ,<br>А | $I_3$ ,<br>А | $\varphi$ ,<br>град | $U_{12}$ ,<br>В | $U_{23}$ ,<br>В | $U_{34}$ ,<br>В | $U_{24}$ ,<br>В | $U_{14}$ ,<br>В |           |
|--------------|--------------|--------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
|              |              |              |                     |                 |                 |                 |                 | 100             | Вычислено |
|              |              |              |                     |                 |                 |                 |                 | 100             | Измерено  |

9. По опытным данным построить векторную диаграмму токов и напряжений, на которой показать выполнение законов Кирхгофа. Сделать выводы по проделанной работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Мгновенное значение синусоидального тока и его временная диаграмма.

2. Изображение синусоидальных величин векторами и комплексными числами.

3. Действия с комплексными числами.

4. Временные и векторные диаграммы токов и напряжений при включении в цепь синусоидального тока активного, индуктивного и емкостного элементов.

5. Понятие активной и реактивной, полной мощности.

6. Режим резонанса напряжений в цепи синусоидального тока. Добротность резонансного контура.

7. Режим резонанса тока в цепи синусоидального тока. Добротность резонансного контура.

8. По данным, полученным в лабораторной работе, поясните ход резонансных кривых.

9. Определение параметров приемников, включаемых в цепь синусоидального тока, опытным путем.

10. Поясните порядок построения векторных диаграмм

для различных режимов работы цепи по отчету по лабораторной работе.

11. Закон Ома в комплексной форме записи.

12. Законы Кирхгофа в комплексной форме записи.

13. Определение комплексного сопротивления при последовательном, параллельном и смешанном соединении приемников.

14. На примере электрической схемы, рассматриваемой в лабораторной работе, поясните алгоритм расчета токов и напряжений в цепях синусоидального тока.

15. Построение векторных диаграмм. Как на векторной диаграмме показывается угол сдвига фаз между напряжением и током участка цепи.

16. На векторной диаграмме, построенной по экспериментальным данным, покажите выполнение законов Кирхгофа.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Цель работы: изучение конструкции и принципа работы однофазного трансформатора; лабораторное исследование трансформатора в различных режимах работы: холостой ход, короткое замыкание, нагрузочный режим; построение основных графических зависимостей характеризующих работу трансформатора.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Трансформатор является электромагнитным аппаратом, служащим для преобразования переменного тока из одного напряжения другое без изменения частоты.

Выпускается большое количество трансформаторов разных типов и мощностей, предназначенных для работы в различных режимах. Целый ряд государственных стандартов создан для установления одинаковых технических требований к трансформаторам и отражающих условия их работы, перегрузки и т.д. Приведем некоторые из основных стандартов в области трансформаторостроения и эксплуатации силовых трансформаторов:

- «Трансформаторы силовые масляные общего назначения, классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ. Технические условия». ГОСТ 17544.
- «Трансформаторы силовые. Общие технические требования». ГОСТ 11677.
- «Трансформаторы силовые масляные общего назначения до 35 кВ. Технические условия». ГОСТ 11920.
- «Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения мощностью от 25 до 630 кВА на напряжение до 35 кВ. Технические условия». ГОСТ 12022.

- «Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические условия». ГОСТ 12965.

Большое распространение, наряду с силовыми трансформаторами, получили автотрансформаторы, служащие для изменения напряжения в небольших пределах, а также для плавного регулирования напряжения в лабораторных условиях (ЛАТОРы); измерительные трансформаторы, которые применяются в цепях измерительных приборов, например трансформаторы тока и напряжения; сварочные трансформаторы; печные трансформаторы; испытательные трансформаторы и различные типы специальных трансформаторов.

## **КОНСТРУКЦИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Силовой трансформатор включает в себя большую спецификацию различных конструктивных элементов, основными из которых выступают: магнитопровод, обмотки, бак и др. Магнитопровод вместе с обмотками на его стержнях называется активной частью силового трансформатора. Остальные элементы конструкции называются пассивными частями, так как они не участвуют в процессе передачи энергии из одной обмотки в другую.

Магнитопровод трансформатора служит для проведения основного магнитного потока трансформатора. Он изготавливается из тонколистовых (0,35...0,5 мм) электротехнических сталей, обладающих специальными магнитными свойствами. Для производства магнитопровода силового трансформатора применяют горячекатаные электротехнические стали марок 1511, 1512, 1513 и холоднокатаные электротехнические стали марок 3411, 3412, 3413. Основными функциями магнитопровода являются то, что он представляет собой магнитный контур цепи, по которой протекает основной магнитный поток трансформатора, а также он используется для установки и крепления обмоток. Магнитопровод собирают из стальных лис-

тов, покрытых изолирующей лаковой или оксидной пленкой, что позволяет уменьшить влияние вихревых токов, и соответственно, уменьшить величину потерь в стали трансформатора.

Магнитопроводы делят по конструкции на стержневые и броневые. Силовые трансформаторы, как правило, имеют стержневой сердечник.

По способу соединения стержней и ярма магнитопроводы делят на стыковые, шихтованные, навитые (ленточные). В стыковых конструкциях стержни и ярма собирают из листов электротехнической стали отдельно, а потом соединяют после размещения обмоток на стержнях. Такие конструкции отличаются простотой сборки и демонтажа, но в местах стыка возникают значительные вихревые токи, что ведет к увеличению потерь в стали трансформатора. В шихтованных конструкциях листы стержней и ярм собирают в переплет, поэтому они не имеют стыка, что приводит к уменьшению потерь в стали трансформатора и тока холостого хода. В витых конструкциях отдельные части магнитопровода навиваются из лент рулонной электротехнической стали и соединяются.

Части магнитопровода, на которых расположены обмотки, называют стержнями, а части, соединяющие стержни между собой – ярмами.

Поперечное сечение стержня представляет собой ступенчатый многоугольник, вписанный в окружность, чем больше диаметр окружности и мощнее трансформатор, тем больше ступеней у многоугольника. Сечение стержней маломощных трансформаторов представляет собой квадрат.

Ярмо, соединяющее стержни, изготавливают обычно с более простым по конфигурации поперечным сечением, чем у стержня, и которое имеет на 5-15% больше по площади сечение, чем сечение стержней, что уменьшает нагрев стали и потери энергии в ней.

В основе принципа работы силового трансформатора лежит закон электромагнитной индукции. Назначением обмоток трансформатора является создания переменного магнитно-

го поля, с помощью которого происходит передача электрической энергии из первичной обмотки во вторичную, а также вводятся ЭДС.

Обмотки изготавливают из медных или алюминиевых обмоточных изолированных проводов круглого или прямоугольного сечения. В зависимости от того как обмотки высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения располагаются на стержне друг относительно друга их делят на концентрические и чередующиеся.

В случае применения концентрических обмоток любое поперечное сечение стержня силового трансформатора представляет собой концентрические окружности, образованные обмотками ВН и НН. Ближе к стержню располагают обмотки НН, дальше от него – обмотки ВН. Между обмотками устанавливают изоляционную конструкцию. Обмотку НН также изолируют и от сердечника трансформатора.

В случае применения чередующихся обмоток трансформатора обмотки ВН и НН разделяют на отдельные катушки небольшой высоты и собирают группами в чередующемся порядке: одна катушка НН, затем катушка ВН и вновь НН и т.д. Группы катушек соединяют. В силовых трансформаторах чередующиеся обмотки применяют редко, так как они технологически более сложны, чем концентрические.

Начала фаз обмоток ВН обозначают А, В, С, а начала фаз обмоток низкого напряжения – а, b, с. Концы фаз обмоток ВН обозначают X, Y, Z, а концы фаз обмоток низкого напряжения – x, y, z. Нулевой или нейтральный вывод обозначают цифрой 0. Начала фаз обмоток трансформатора выводятся из бака с применением проходных фарфоровых изоляторов или вводов.

По способу охлаждения трансформаторы делят на масляные и сухие. В сухих трансформаторах применяется воздушное охлаждение, силовые трансформаторы, как правило, охлаждаются маслом. В последнем случае сердечник трансформатора с находящимися на нём обмотками ВН и НН поме-



шают в бак с трансформаторным маслом. Трансформаторное масло, омывая обмотки и магнитопровод, отводит от них выделяющиеся тепло к стенкам бака, а также является дополнительной электрической изоляцией.

Баки силовых трансформаторов конструктивно выполняют гладкими, ребристыми, трубчатыми, радиаторными. С ростом мощности увеличиваются потери в трансформаторе и для обеспечения его охлаждения до допустимых рабочих температур увеличивают площадь поверхности охлаждения. Для этого применяют ребристые и трубчатые баки. В стенках трубчатых баков расположены трубы в 1-3 ряда. Если этого не достаточно, то вместо труб используются радиаторы, которые при больших мощностях трансформаторов могут обдувать вентиляторами для более интенсивного теплоотвода.

Различное вспомогательное оборудование служит для контроля за состоянием масла, защиты от воздействия окружающей среды, от деформации и разрушения бака при внутренних аварийных ситуациях в трансформаторе и включает в себя ряд устройств.

При контакте масла и воздуха оно окисляется и теряет свои электроизоляционные характеристики. Чтобы уменьшить площадь поверхности соприкосновения масла с воздухом используют расширитель (стальной бачок, объемом до 10% от общего объема масла), который устанавливается на крышке бака трансформатора и служит для компенсации тепловых колебаний уровня масла в баке трансформатора в широком рабочем диапазоне температур.

В случае быстрого интенсивного нагрева масла, например, при межвитковом коротком замыкании или пробое изоляции, оно разлагается с выделением токсичного взрыво- и пожароопасного газа, что приводит к увеличению давления внутри бака. Для из того чтобы избежать деформации и разрушения бака в этом аварийном режиме, на крышке бака устанавливается выхлопная труба со стеклянной мембраной, лопающейся при увеличении давления.

Газовое реле, устанавливаемое между расширителем и баком, служит для защиты от повреждений и вывода трансформатора в ремонт, в аварийных ситуациях, сопровождающихся выделением газа. Реле дает сигнал о выделении газа и на отключения трансформатора от линии.

Арматура бака (задвижки, краны, пробки и т.д.) используется для отбора, взятия пробы, спуска, залива, долива масла в трансформаторе.

## УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП РАБОТЫ И УРАВНЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Принцип работы трансформатора основан на законе электромагнитной индукции. Трансформатор состоит из двух или нескольких обмоток, связанных электромагнитно. Для усиления магнитной связи, обмотки располагаются на стальном сердечнике, как показано на рис. 3.1.

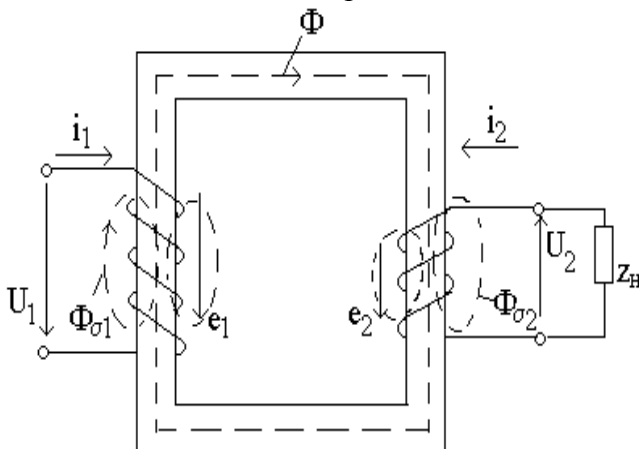


Рис. 3.1. Принцип работы трансформатора [7]

Если к одной обмотке подвести напряжение  $U_1$ , то в ней возникнет ток  $i_1$ , и в сердечнике возбуждается изменяющийся магнитный поток  $\Phi$ , который индуцирует в обмотках ЭДС  $e_1$

и  $e_2$ , условно положительные направления ЭДС, и потока, наводящего эти ЭДС, связаны правилом правого ходового винта или буравчика. Если вторичную обмотку замкнуть на сопротивление нагрузки  $Z_H$ , то возникает ток  $i_2$ , который создает свой магнитный поток. В результате в сердечнике возникает общий магнитный поток  $\Phi$ , сцепленный с витками обеих обмоток, который называется основным или рабочим.

Кроме основного магнитного потока токи обмоток  $i_1$  и  $i_2$  создают магнитные поля рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$ , сцепленные только с одной обмоткой.

Обмотка трансформатора к которой подводится энергия из системы называется первичной. От другой энергия отводится к потребителю – она называется вторичной. Все величины, относящиеся к первичной обмотке называются первичными и обозначаются индексом 1, а относящиеся к вторичной обмотке – вторичными и обозначаются индексом 2.

В общем случае  $U_1 \neq U_2$ . При  $U_2 > U_1$  – трансформатор называется повышающим; при  $U_1 < U_2$  – трансформатор называется понижающим. Трансформатор, имеющий две обмотки (одну первичную и одну вторичную) называется двухобмоточным. С тремя и более обмотками называется трехобмоточным или многообмоточным.

Обмотка, присоединенная к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высокого напряжения (ВН). Обмотка, присоединённая к сети меньшего напряжения, называется обмоткой низкого напряжения (НН).

Передача электрической энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную осуществляется посредством переменного магнитного поля. В первичной обмотке происходит преобразование электрической энергии, потребляемой из сети, в энергию магнитного поля, а в вторичной – преобразование энергии магнитного поля в электрическую энергию, отдаваемую нагрузке [7].

Трансформаторы, которые преобразуют однофазный ток, называются однофазными, в случае преобразования трех-

фазного тока – трехфазными.

Работа трансформатора основывается на принципе электромагнитного взаимодействия двух или большего числа обмоток, неподвижных друг относительно друга, как это показано на рис. 3.1.

Пусть  $u_1$  – мгновенное значение напряжения, подводимое к первичной обмотке частоты  $f_1$ . Под влиянием  $u_1$  в первичной обмотке возникает ток  $i_1$  и в сердечнике возбуждается изменяющийся магнитный поток  $\Phi$ , который индуцирует в обмотках трансформатора ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ .

При замыкании вторичной обмотки на сопротивление нагрузки  $Z_H$  возникает ток  $i_2$ , который возбуждает свой магнитный поток. В результате в сердечнике трансформатора создается общий магнитный поток  $\Phi$ , сцепленный с витками обеих обмоток, который называется основным или рабочим потоком. Он индуцирует в обмотке ЭДС

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi_{10}}{dt}; \quad (93)$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi_{20}}{dt}. \quad (94)$$

Здесь  $\Psi_{10}$ ,  $\Psi_{20}$  – потокосцепления обмоток, созданные основным магнитным потоком.

Кроме основного потока, токи обмоток создают так называемые поля рассеивания. Эти поля сцеплены с витками только одной обмотки – первичной  $\Phi_{\sigma_2}$  или вторичной  $\Phi_{\sigma_1}$ . Поля рассеяния замыкаются в основном помимо сердечника, поэтому можно считать, что индуктивности рассеяния постоянны:  $L_{\sigma_1} = \text{const}$ ;  $L_{\sigma_2} = \text{const}$ .

Поля рассеяния индуцируют в обмотках ЭДС

$$e_{\sigma_1} = -W_1 \frac{d\Phi_{\sigma_1}}{dt} = -L_{\sigma_1} \frac{di_1}{dt}; \quad (95)$$

$$e_{\sigma_2} = -W_2 \frac{d\Phi_{\sigma_2}}{dt} = -L_{\sigma_2} \frac{di_2}{dt}. \quad (96)$$

Согласно второму закону Кирхгофа, уравнения равновесия напряжений для обмотки трансформатора можно записать в виде:

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma_1} + r_1 \cdot i_1; \quad (97)$$

$$u_2 = e_2 + e_{\sigma_2} - r_2 \cdot i_2. \quad (98)$$

Тогда имеем:

$$u_1 = \frac{d\Psi_{10}}{dt} + L_{\sigma_1} \frac{di_1}{dt} + r_1 \cdot i_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} + r_1 \cdot i_1; \quad (99)$$

$$u_2 = -\frac{d\Psi_{20}}{dt} - L_{\sigma_2} \frac{di_2}{dt} - r_2 \cdot i_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} - r_2 \cdot i_2, \quad (100)$$

где  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  – полные потокосцепления обмоток, созданные основным потоком и потоками рассеяния.

Потокосцепления обмоток трансформатора  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= L_1 \cdot i_1 + M_{12} \cdot i_2; \\ \Psi_2 &= L_2 \cdot i_2 + M_{21} \cdot i_1, \end{aligned} \quad (101)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – полные индуктивности обмоток,  
 $M_{12}=M_{21}=M$  – взаимоиндуктивности между обмотками.

Далее, предполагая, что  $L_1$ ,  $L_2$  и  $M=\text{const}$ , получим следующую систему уравнений

$$\begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + r_1 \cdot i_1; \\ u_2 &= -L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} - r_2 \cdot i_2. \end{aligned} \quad (102)$$

Эти уравнения называются уравнениями напряжения трансформатора.

Токи в обмотках трансформатора создают МДС  $W_1 \cdot i_1$  и

$W_2 \cdot i_2$ . Согласно второму закону Кирхгофа, в применении к магнитной цепи можно написать

$$W_1 \cdot i_1 + W_2 \cdot i_2 = W_1 \cdot i_0, \quad (103)$$

где  $W_1 \cdot i_0$  – намагничивающая составляющая МДС, идущая на создание в сердечнике основного магнитного потока  $\Phi$ . Это уравнение называется уравнением МДС.

Если напряжения, ЭДС и токи изменяются по синусоидальному закону, то действующие их значения можно изобразить комплексами  $\dot{U}$ ,  $\dot{E}$  и  $\dot{I}$ . В этом случае уравнение для ЭДС от полей рассеяния можно записать так

$$\begin{aligned} e_{\sigma_1} &= -L_{\sigma_1} \frac{di_1}{dt} = -L_{\sigma_1} \frac{d(I_{1m} \cdot \sin \omega t)}{dt} = \\ &= -L_{\sigma_1} \cdot \omega \cdot I_{1m} \cdot \cos \omega t = -x_1 \cdot I_{1m} \cos \omega t. \end{aligned} \quad (104)$$

Видим, что ЭДС  $e_{\sigma_1}$  отстает по фазе от тока  $i_1$  на  $90^\circ$  и ее действующее значение можно записать, как

$$\dot{E}_{\sigma_1} = -j \cdot x_1 \cdot \dot{I}_1, \quad (105)$$

где  $x_1 = \omega L_{\delta 1}$  – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.

Аналогично  $\dot{E}_{\sigma_2} = -j \cdot x_2 \cdot \dot{I}_2$ .

С учетом этого вместо уравнений для мгновенных значений можно записать уравнения в комплексной форме

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \cdot x_1 \cdot \dot{I}_1 + r_1 \cdot \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + z_1 \cdot \dot{I}_1; \quad (106)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j \cdot x_2 \cdot \dot{I}_2 - r_2 \cdot \dot{I}_2 = \dot{E}_2 - z_2 \cdot \dot{I}_2, \quad (107)$$

где  $z_1 = r_1 + j \cdot x_1$ ;  $z_2 = r_2 + j \cdot x_2$ .

Тогда можно записать и уравнения

$$\dot{U} = j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_2 + r_1 \cdot \dot{I}_1; \quad (108)$$

$$\dot{U}_2 = -j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot \dot{I}_2 - j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_1 - r_2 \cdot \dot{I}_2. \quad (109)$$

Уравнение МДС в этом случае примет вид

$$W_1 \cdot \dot{I}_1 + W_2 \cdot \dot{I}_2 = W_1 \cdot \dot{I}_0. \quad (110)$$

## ПРИВЕДЕННЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

В общем случае  $W_1 \neq W_2$ , следовательно, и  $E_1 \neq E_2$  и  $I_1 \neq I_2$ . Это затрудняет сопоставление и количественный учет процессов, происходящих в обмотках трансформатора, особенно при больших коэффициентах трансформации. Чтобы избежать этого действительный трансформатор заменяется приведенным, когда обе обмотки приводят к одному числу витков. Обычно вторичную обмотку приводят к первичной. Для этого действительную вторичную обмотку заменяют приведенной с числом витков, равным  $W_1$ . Режим работы трансформатора от приведения не изменяется.

Все величины, относящиеся к приведенной вторичной обмотке, называются приведенными и обозначаются теми же символами, что и действительные величины, но со штрихом сверху  $E'_2, I'_2, W'_2$  и т.п.

С учетом этого найдем:

1) число витков приведенной вторичной обмотки  $W'_2 = W_1$ ;

2) приведенная ЭДС вторичной обмотки  $E'_2 = E_1 = k \cdot E_2$ ;

3) приведенный ток определяется из условия, что полная внутренняя мощность вторичной обмотки остается без изменений  $E_2 \cdot I_2 = E'_2 \cdot I'_2$ , тогда  $I'_2 = I_2 \cdot \frac{E_2}{E'_2} = \frac{1}{k} \cdot I_2$ ;

4) приведенное значение активного сопротивления

вторичной обмотки определяется из условия, что потери в обмотке остаются без изменений  $r_2 \cdot I_2^2 = r'_2 \cdot (I'_2)^2$ , отсюда  $r'_2 = r_2 \cdot \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 = r_2 \cdot k^2$ ;

5) для того, чтобы режим работы трансформатора не изменился, в таком же отношении должно измениться и  $x_2$ , таким образом  $x'_2 = x_2 \cdot k^2$ .

Аналогично приводятся активные и реактивные сопротивления нагрузки, включаемой во вторичную обмотку [7].

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Для уравнений приведенного трансформатора в установившемся режиме работы может быть составлена электрическая схема замещения, когда магнитная связь между обмотками заменяется электрической, что значительно упрощает расчет и анализ работы трансформатора.

Уравнения равновесия напряжений для приведенного трансформатора принимают вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + z_1 \cdot \dot{I}_1; \quad (111)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - z'_2 \cdot \dot{I}'_2, \quad (112)$$

где  $z'_2 = r'_2 + j \cdot x'_2$ .

Уравнение МДС для приведенного трансформатора имеет вид

$$W_1 \cdot \dot{I}_1 + W'_2 \cdot \dot{I}'_2 = W_1 \cdot \dot{I}_0. \quad (113)$$

Но в приведенном трансформаторе  $W'_2 = W_1$ , поэтому  $\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$ , то есть уравнение МДС превращается в уравнение токов. Его обычно записывают в виде

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (114)$$



В этом случае ток  $\dot{I}_1$  представляется состоящим из двух составляющих: первая  $\dot{I}_0$  – идет на создание основного магнитного потока; вторая, равная току во вторичной обмотке с обратным знаком ( $-\dot{I}'_2$ ), – на компенсацию размагничивающего влияния вторичной обмотки.

В соответствии с уравнениями равновесия напряжения и токов трансформатор можно изобразить в виде электрических схем замещения, как на рис. 3.2.

Так как в приведенном трансформаторе  $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ , то точки  $a$  и  $a'$ ,  $b$  и  $b'$  являются равнопотенциальными соответственно, и ветви  $a-b$  и  $a'-b'$  можно совместить в одну ветвь с током  $\dot{I}_0 = \dot{I}'_1 + \dot{I}'_2$ .

В этом случае объединенная ветвь играет роль намагничивающего контура, который создает основной магнитный поток  $\Phi$  (см. рис. 3.3).

Мощность, расходуемая в этом контуре, определяется потерями в стали. Изображенная на рис. 3.3. схема замещения называется Т-образной [7].

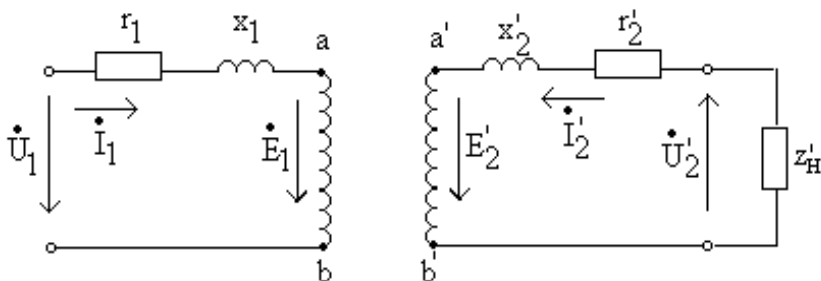


Рис. 3.2. Электрические схемы обмоток трансформатора [7]

В связи с этим можно написать

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -z_m \cdot \dot{I}_0 = -(r_m + j \cdot x_m) \cdot \dot{I}_0, \quad (115)$$

где  $Z_m = r_m + jx_m$  – полное сопротивление намагничивающего контура;

$$r_m = P_c / I_0^2;$$

$$x_m = \omega \cdot M.$$

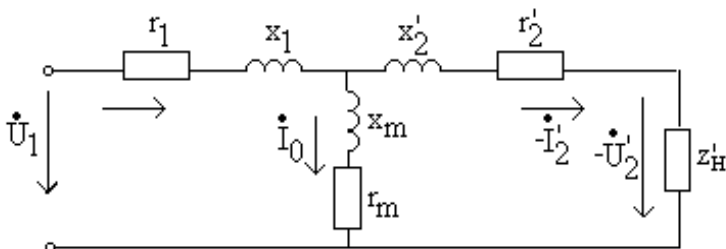


Рис. 3.3. Т-образная схема замещения трансформатора [7]

## КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

Полезная мощность трансформатора определяется

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2,$$

где  $\varphi_2$  – угол сдвига фаз между  $U_2$  и  $I_2$ , который зависит от характера нагрузки трансформатора.

Мощность, потребляемая трансформатором из сети:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (116)$$

Суммарная мощность потерь трансформатора

$$\Delta P_\Sigma = P_1 - P_2. \quad (117)$$

Потери мощности складываются

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_c + \Delta P_m, \quad (118)$$

где  $\Delta P_c$  – магнитные потери в стальном сердечнике трансформатора затрачиваемые на перемагничивание сердеч-

ника (потери на гистерезис) и вихревые токи, мощность этих потерь зависит от частоты и амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе и материала, из которого он изготовлен; при постоянном действующем значении напряжения первичной обмотки потери стали постоянными и не зависят от нагрузки, поэтому их называют постоянными потерями;

$\Delta P_m$  – тепловые потери в медных обмотках, которые зависят от токов и поэтому называются *переменными потерями*; потери в меди пропорциональны квадрату коэффициента нагрузки  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ .

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_m}. \quad (119)$$

Используя данные опытов холостого хода и короткого замыкания, можно рассчитать КПД трансформатора для любого значения коэффициента нагрузки  $\beta = I_2/I_{2H}$ :

$$\eta' = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_{10} + \beta^2 \cdot P_{KH}}, \quad (120)$$

где  $P_{10}$  – мощность потерь в стали при  $U_1 = U_{1H}$  (по данным опыта холостого хода),

$P_{KH}$  – мощность потерь в меди обмоток при  $I_1 = I_{1H}$  и  $I_2 = I_{2H}$  (по данным опыта короткого замыкания).

При  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  КПД является функцией  $\beta$ . Задаваясь различными значениями  $\beta$ , получим зависимость КПД трансформатора от нагрузки  $\eta = f(\beta)$ , которую можно представить в виде кривой в прямоугольной системе координат (рис. 3.4).

Функция  $\eta = f(\beta)$  имеет максимум, когда  $\Delta P_M = \Delta P_c$ , т.е. когда постоянные потери в стали ( $\Delta P_c = P_{10} = \text{const}$ ) становятся равными переменным потерям меди ( $\Delta P_M = \beta_{\text{опт}}^2 P_{\text{кн}}$ ).

Следовательно,  $\beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_{10}/P_{\text{кн}}}$ .

В современных трансформаторах отношение потерь холостого хода к потерям короткого замыкания равно 0,2-0,4, а максимальное значение КПД достигает значений 0,98-0,995 при  $\beta_{\text{н0}} = 0,45 - 0,65$ .

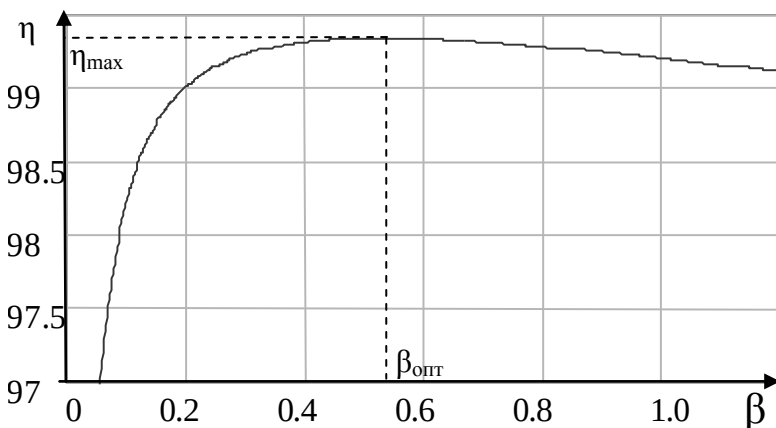


Рис. 3.4. Зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки [2]

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

### РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА

Холостым ходом трансформатора называется такой режим его работы, когда первичная обмотка включена в сеть, а вторичная обмотка разомкнута. В этом случае трансформатор подобен катушке со стальным сердечником.

Под действием напряжения  $u_1$  в первичной обмотке возникает ток холостого хода  $i_0$ , который создает МДС  $W_1 \cdot I_0$  и магнитный поток  $\Phi$ ; меньшая часть сцеплена только с первич-

ной обмоткой – это поток рассеяния  $\Phi_{\sigma_1}$  (см. рис. 3.1).

Обычно в трансформаторах при холостом ходе поток рассеяния  $\Phi_{\sigma_1}$  мал и им можно пренебречь. Если при этом пренебречь активным сопротивлением первичной обмотки  $r_1 \approx 0$ , то трансформатор называется простейшим.

Уравнения напряжения такого трансформатора имеют вид:

$$u_1 = -e_1; \quad (121)$$

$$u_2 = e_2. \quad (122)$$

Отсюда следует, что подводимое к первичной обмотке напряжение, в любой момент времени уравнивается ЭДС.

Это позволяет определить основной магнитный поток

$$u_1 = -e_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (123)$$

Тогда имеем, что

$$\Phi(t) = \frac{1}{W_1} \cdot \int u_1 dt. \quad (124)$$

При синусоидальном напряжении  $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$  магнитный поток равен

$$\Phi(t) = \frac{U_{1m}}{W_1} \cdot \int \sin \omega t \cdot dt = -\frac{U_{1m}}{\omega W_1} \cdot \cos \omega t = \Phi_m \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (125)$$

где  $\Phi_m = \frac{U_{1m}}{\omega \cdot W_1} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{2\pi \cdot f \cdot W_1} = \frac{U_1}{4.44 \cdot f \cdot W_1}$  – амплитуда основного магнитного потока.

Таким образом, при синусоидальном напряжении  $u_1$ , основной магнитный поток в сердечнике также изменяется по синусоидальному закону и отстает во времени от напряжения на угол  $\pi/2$ .

ЭДС в первичной обмотке равна

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega \cdot W_1 \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{1m} \cdot \sin(\omega t - \pi). \quad (126)$$

Действующее значение этой ЭДС

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot W_1 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m. \quad (127)$$

Аналогично можно найти, что  $E_2 = 4.44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_m$ .

Величину и форму кривой изменения тока  $i_0$  можно найти, зная магнитную характеристику (кривую намагничивания) сердечника. Имеем, что при синусоидальном потоке ток холостого хода несинусоидален. Несинусоидальность формы кривой тока  $i_0$  чрезвычайно затрудняет расчет трансформатора. Поэтому реальный несинусоидальный ток заменяется эквивалентным синусоидальным при условии равенства их действующих значений.

В реальном трансформаторе необходимо учесть поток рассеяния и активное сопротивление первичной обмотки.

В этом случае уравнение равновесия напряжения будет иметь вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + r_1 \cdot \dot{I}_0 + j \cdot x_1 \cdot \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + z_1 \cdot \dot{I}_0. \quad (128)$$

Ток холостого хода мал. В силовых трансформаторах он составляет  $I_0 = (0.4 \div 4)\%$  от  $I_n$ .

Поэтому падение напряжения  $z_1 \cdot I_0$  обычно меньше 0,5% от  $U_n$ . Потери  $r_1 \cdot I_0^2$  также очень малы и их обычно не учитывают. Считается, что потери при холостом – это потери в стали.

Потери в стали состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Обычно они рассчитываются по величине удельных потерь. Это основные потери. Кроме основных в стали сердечника возникают добавочные потери (в конструктивных элементах, в изоляции трансформаторов и т.п.), которые составляют обычно (15÷20)% от основных [7].

## КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Коротким замыканием трансформатора называется такой режим работы, когда вторичная обмотка замкнута накоротко, а к первичной обмотке подводится напряжение.

Если напряжение, подводимое к первичной обмотке, равно номинальному ( $U_1 = U_{1n}$ ), то ток короткого замыкания

достигает значений  $I_{1k} \geq (10 \div 20)I_{1н}$ .

Такое короткое замыкание возникает в эксплуатационных условиях и поэтому называется эксплуатационным коротким замыканием.

Из-за больших токов оно представляет большую опасность, поэтому в схеме включения трансформатора устанавливается релейная защита, отключающая его при коротких замыканиях.

Другим видом является опытное короткое замыкание. В этом случае к первичной обмотке подводится пониженное напряжение  $U_{1k}$  – такое, чтобы токи в обмотках трансформатора были равны номинальным.

Если выразить это напряжение в процентах по отношению к номинальному, то получим величину

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1н}} \cdot 100\%, \quad (129)$$

которая называется напряжением короткого замыкания.

В силовых трансформаторах  $u_k = (5 \div 10)\%$ . Эта весьма важная величина указывается в паспортных данных трансформатора.

Рассмотрим условия работы приведенного трансформатора при коротком замыкании, схема которого изображена на рис. 3.5. Под влиянием напряжения  $\dot{U}_{1k}$  в обмотках трансформатора возникают токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}'_2$ , которые создают МДС  $F_1 = W_1 \cdot I_1$  и  $F'_2 = W'_2 \cdot I'_2$ .

Под влиянием этих МДС в сердечнике трансформатора возникает основной магнитный поток  $\Phi_k$  и потоки рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$ , которые индуктируют в обмотках ЭДС  $E_{1k}$ ,  $E'_{2k}$  и  $\dot{E}_{\sigma 1} = -x_1 \cdot \dot{I}_1$ ,  $\dot{E}_{\sigma 2} = -j \cdot x'_2 \cdot \dot{I}'_2$ .

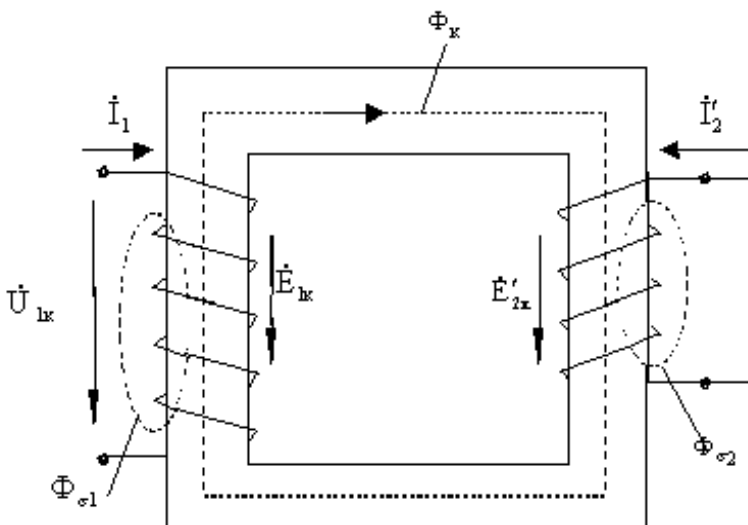


Рис. 3.5. Короткое замыкание однофазного трансформатора [7]

Уравнения равновесия напряжений для обмоток трансформатора в этом случае можно записать в виде:

$$\dot{U}_{1к} = -\dot{E}_{1к} + r_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot x_1 \cdot \dot{I}_1 = -\dot{E}_{1к} + z_1 \cdot \dot{I}_1; \quad (130)$$

$$0 = \dot{E}'_{2к} - r'_2 \cdot \dot{I}'_2 - j \cdot x'_2 \cdot \dot{I}'_2 = \dot{E}'_{2к} - z'_2 \cdot \dot{I}'_2. \quad (131)$$

Так как в силовых трансформаторах  $\dot{U}_{1к}$  составляет всего  $(5 \div 10)\%$  от  $U_{1н}$ , то основной магнитный поток  $\Phi_k$  мал, а необходимая для его создания МДС  $F_0 = w_1 \cdot I_0$  так невелика, что ею можно пренебречь.

Тогда уравнение токов примет вид:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = 0 \text{ или } \dot{I}_1 = -\dot{I}'_2. \quad (132)$$

Учитывая, что в приведенном трансформаторе  $E_1 = E'_2$ , уравнение равновесия напряжения для первичной обмотки можно записать в виде:



$$\begin{aligned}\dot{U}_{1к} &= -z'_2 \cdot \dot{I}'_2 + z_1 \cdot \dot{I}_1 = z'_2 \cdot \dot{I}_1 + z_1 \cdot \dot{I}_1 = \\ &= [(r_1 + j \cdot x_1) + (r'_2 + j \cdot x'_2)] \cdot \dot{I}_1 = (r_k + j \cdot x_k) \cdot \dot{I}_1 = z_k \cdot \dot{I}_1,\end{aligned}\quad (133)$$

где  $r_k = r_1 + r'_2$ ;  $x_k = x_1 + x'_2$ ;  $z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$  — называются параметрами трансформатора.

Уравнения равновесия напряжения для первичной обмотки позволяет составить схему замещения трансформатора при коротком замыкании, представленную на рис. 3.6.

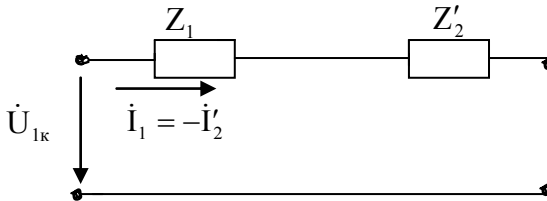


Рис. 3.6. Схема замещения однофазного трансформатора при коротком замыкании [7]

Используя схему замещения можно построить векторную диаграмму, как показано на рис. 3.7. При её построении сначала откладываем в масштабе ток  $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$ , затем  $r_k \dot{I}_1$  и  $jx_k \dot{I}_1$ .

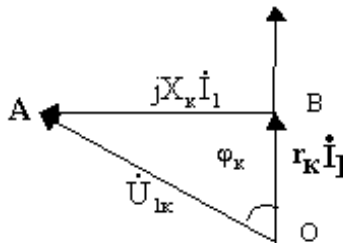


Рис. 3.7. Векторная диаграмма однофазного трансформатора при коротком замыкании [7]

Треугольник OAB называется треугольником короткого замыкания. Если при построении векторной диаграммы

$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1н}$ , то напряжение короткого замыкания можно записать в виде

$$u_k = \frac{z_k \cdot I_{1н}}{U_{1н}} \cdot 100\% \quad (134)$$

Эту величину можно разложить на активную и реактивную составляющие

$$u_{ка} = U_k \cdot \cos \varphi_k = \frac{r_k \cdot I_{1н}}{U_{1н}} \cdot 100\%; \quad (135)$$

$$u_{кр} = U_k \cdot \sin \varphi_k = \frac{x_k \cdot I_{1н}}{U_{1н}} \cdot 100\%. \quad (136)$$

Величины  $u_k$ ,  $u_{ка}$  и  $u_{кр}$  указываются в паспортных данных трансформатора и они, позволяют рассчитать параметры короткого замыкания  $z_k$ ,  $r_k$ ,  $x_k$ .

Если при коротком замыкании  $U_1 = U_{1н}$ , то установившееся значение тока короткого замыкания в соответствии со схемой замещения можно определить как

$$I_{1к} = \frac{U_{1н}}{z_k} = \frac{U_{1н}}{z_k} \cdot \frac{I_{1н}}{I_{1н}} \cdot \frac{100}{100} = \frac{100}{\frac{z_k}{U_{1н}} \cdot I_{1н} \cdot 100} = \frac{100}{u_k, \%} \cdot I_{1н}. \quad (137)$$

Как уже отмечалось ранее, при коротком замыкании основной магнитный поток мал, поэтому потерями в стали сердечника можно пренебречь и считать, что мощность, потребляемая трансформатором при коротком замыкании, расходуется только на потери электрические потери в обмотках (потери в меди)

$$P_{1к} = P_{эл1} + P_{эл2} = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2}. \quad (138)$$

Здесь мы рассматривали короткое замыкание однофазного трансформатора.

При трехфазном коротком замыкании трехфазного трансформатора, которое называется симметричным коротким замыканием, процессы в каждой фазе не отличаются от рас-

смотренных выше.

На этом основании все сказанное выше о коротком замыкании однофазного трансформатора можно относить и к трехфазным трансформаторам [7].

## РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

Принципиальная схема однофазного трансформатора, работающего под нагрузкой, представлена на рис. 3.8.

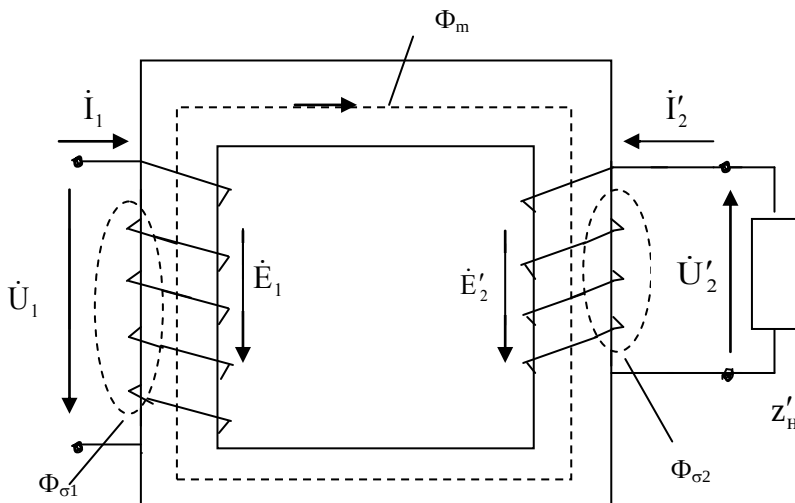


Рис. 3.8. Работа однофазного трансформатора под нагрузкой [7]

В реальном трансформаторе необходимо учесть влияние активного сопротивления обмоток и потоков рассеяния. В этом случае уравнения приведенного трансформатора будут иметь вид:

$$U_1 = -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1; \quad (139)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - r'_2 \dot{I}'_2 - j \cdot x'_2 \dot{I}'_2; \quad (140)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (141)$$

Эти уравнения можно изобразить в виде векторной диаграммы, показанной на рис. 3.9.

В начале откладываем вектор основного магнитного потока  $\dot{\Phi}_m$ . Ток  $\dot{I}_0$ , идущий на создание этого потока, опережает его на угол  $\alpha$ . ЭДС  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$  отстает от  $\dot{\Phi}_m$  на  $90^\circ$ . При активно-индуктивном характере нагрузки, ток  $\dot{I}_2'$  отстает от ЭДС. Это позволяет определить  $I_1$ .

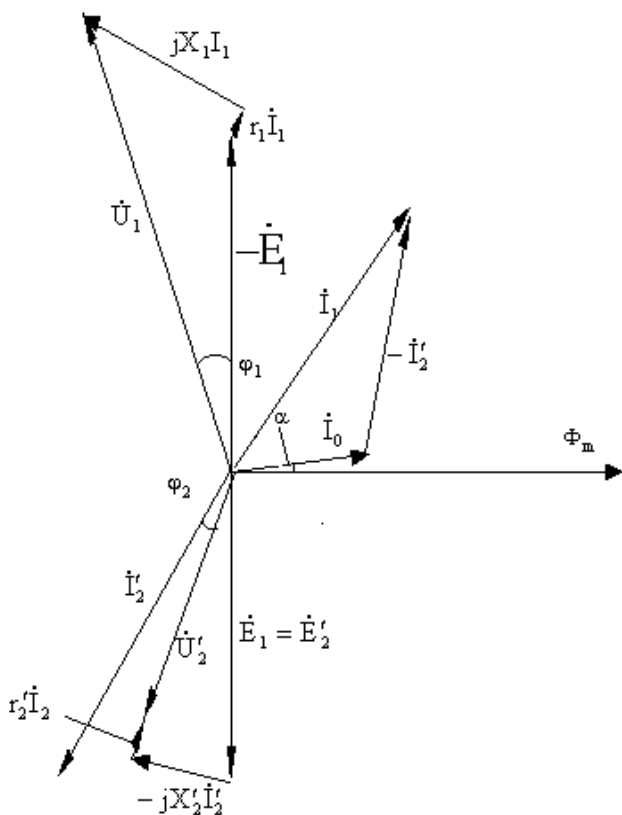


Рис. 3.9. Векторная диаграмма однофазного трансформатора при работе под нагрузкой [7]

В соответствии со вторым уравнением приведенного

трансформатора, находим напряжение на зажимах вторичной обмотки  $U_2$ , а в соответствии с первым уравнением –  $U_1$ .

Угол  $\varphi_1$  позволяет определить активную мощность, подводимую к трансформатору из сети

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1. \quad (142)$$

Векторная диаграмма наглядно отображает процессы, происходящие в трансформаторе. Так из векторной диаграммы следует, что при активно-индуктивной нагрузке напряжение  $U_2$  меньше  $E_2$ . Только при работе холостую ( $I_2 = 0$ )  $U_2 = E_2$ .

Ток в первичной обмотке  $I_1$  автоматически изменяется в зависимости от тока во вторичной обмотке. Векторная диаграмма позволяет проанализировать и режим работы трансформатора. Так при помощи векторной диаграммы можно объяснить зависимость  $\cos\varphi_1 = f(I_2)$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $\cos\varphi_2 = \text{const}$ . Эта зависимость приведена на рис. 3.10.

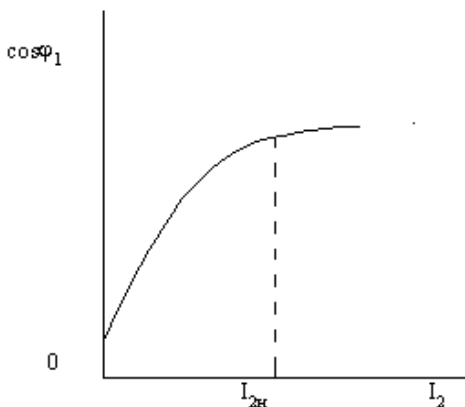


Рис. 3.10. Зависимость  $\cos\varphi_1 = f(I_2)$  трансформатора при работе под нагрузкой [7]

Наименьшее значение  $\cos\varphi_1$  имеет место на холостом

ходу трансформатора  $\cos \varphi_1 \leq 0,1$ . С ростом тока вторичной обмотки (увеличении нагрузки)  $\cos \varphi_1$  увеличивается, достигая максимального значения при номинальной нагрузке [2].

## ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

Схема замещения и векторная диаграмма значительно облегчает анализ различных режимов работы трансформатора. Известно, что при изменении тока нагрузки напряжение  $U_2$  тоже изменяется. Отклонение  $U_2$  от напряжения холостом ходе  $U_{20}$  и при  $U_1 = \text{const}$  характеризуется процентным изменением напряжения

$$\Delta U_2 = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} \cdot 100\%. \quad (143)$$

При номинальной и активно-индуктивной нагрузке силовых трансформаторов  $\Delta U_{2н} = (5 \div 8)\%$ . Зависимость  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = \text{const}$ ,  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  называется внешней характеристикой. Её вид при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  изображён на рис. 3.11.

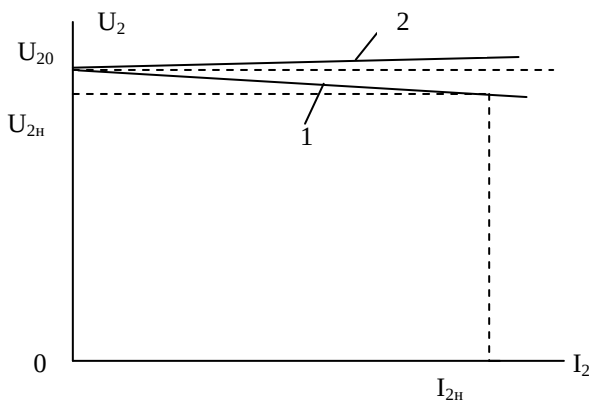


Рис. 3.11. Внешняя характеристика трансформатора [7]

При изменении нагрузки от холостого хода до  $I_{2н}$  напряжение на зажимах вторичной обмотки изменяется на  $\Delta U_{2н}$ .

При активно-ёмкостной нагрузке угол  $\varphi_2$  отрицателен, поэтому и  $\Delta U_2$  будет отрицательной величиной. В этих условиях при увеличении  $I_2$  напряжение на зажимах вторичной обмотки будет расти и внешняя характеристика примет вид кривой 2 на рис 3.11 [7].

## **ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ**

1. Используя рекомендуемую литературу, конспект лекций и настоящее руководство, изучить устройство, принцип действия трансформатора, его работу в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой.

2. Рассчитать номинальные токи первичной и вторичной обмоток, токи и напряжения трансформатора при работе в режимах холостого хода и короткого замыкания.

## **ПРОГРАММА РАБОТЫ**

Объектом исследования в работе является однофазный трансформатор типа ОСВ-0,25 У5 с номинальными данными:  $S_n = 0,25$  кВА,  $f_n = 50$  Гц,  $U_{1н} = 220$  В,  $U_{2н} = 36$  В.

Испытуемый трансформатор, ЛАТР, нагрузочные реостаты, магнитные пускатели, аппараты защиты расположены за панелями стенда, а приборы – на панели, но можно применять и переносные лабораторные приборы. Для измерения угла сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки трансформатора используется фазометр.

1. Записать основные технические (паспортные) данные испытуемого трансформатора.

### **2. Опыт холостого хода:**

а) подобрать электроизмерительные приборы для проведения опыта холостого хода;

б) собрать электрическую схему установки для исследования работы трансформатора в режиме холостого хода (рис. 3.12);

в) установить на первичной обмотке трансформатора напряжение  $U_1=U_{1н}$ . Измерить ток, угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки, напряжение трансформатора. Полученные данные занести в табл. 3.1;

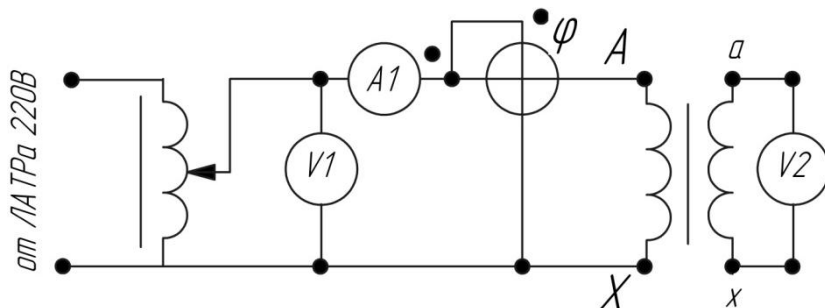


Рис. 3.12. Схема трансформатора в режиме холостого хода

Таблица 3.1

| Измерено       |                |                |                | Вычислено           |     |                 |                     |                     |
|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|-----|-----------------|---------------------|---------------------|
| $U_{1х},$<br>В | $I_{1х},$<br>А | $\varphi_{1х}$ | $U_{2х},$<br>В | $\cos \varphi_{1х}$ | $k$ | $P_{1х},$<br>Вт | $\Delta P_c,$<br>Вт | $\Delta P_m,$<br>Вт |
|                |                |                |                |                     |     |                 |                     |                     |

г) по результатам измерений определить коэффициент трансформации  $k$ ; мощность, потребляемую трансформатором из сети  $P_{1х}$ ; мощность потерь в стали сердечника  $\Delta P_c$ ; мощность потерь в меди обмоток  $\Delta P_m$ .

Коэффициент трансформации определяется следующим образом  $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$ .



В режиме холостого хода мощность вторичной обмотки трансформатора  $P_2=0$ , поэтому мощность первичной обмотки  $P_{1x}$ , представляет собой потери в трансформаторе

$$P_{1x} = \Delta P_c + \Delta P_{m1} = U_1 I_{1x} \cos \varphi_{1x}, \quad (144)$$

где  $\Delta P_c$  – мощность потерь в стали сердечника от гистерезиса и вихревых токов;

$\Delta P_{m1}$  – мощность потерь в меди первичной обмотки;

$\varphi_{1x}$  – угол сдвига фаз между напряжением и током первичной обмотки  $U_1$  и  $I_{1x}$ .

Так как ток холостого хода  $I_{1x}$  очень мал, то мощность  $\Delta P_{m1} = R_1 I_{1x}^2$  незначительна и ею можно пренебречь. Следовательно, в этом случае принимаем  $P_{1x} = \Delta P_c$ . Так как напряжение первичной обмотки равно номинальному, то  $P_{1x} = \Delta P_{сн} = P_{10}$ . По значениям  $I_{1x}$  и  $P_{10}$  судят о качестве стали сердечника и качестве его сборки.

### 3. Опыт короткого замыкания

а) подобрать электроизмерительные приборы для исследования трансформатора в режиме короткого замыкания;

б) собрать схему для проведения опыта короткого замыкания (рис. 3.13);

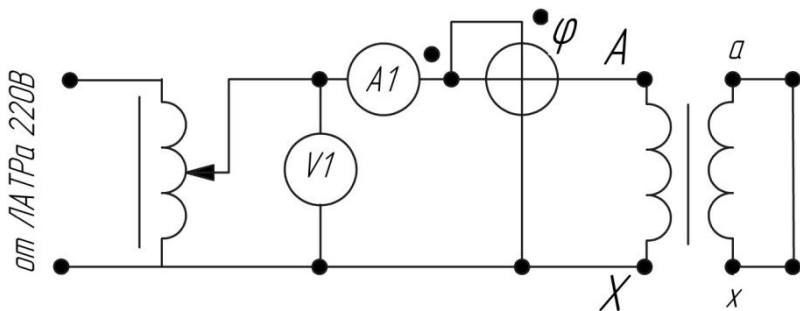


Рис. 3.13. Схема трансформатора в режиме короткого замыкания

в) установить на входе трансформатора такое напряжение  $U_{1к}$  при котором ток в первичной обмотке будет равен номинальному;

Номинальные токи однофазного трансформатора рассчитывают исходя из формулы

$$S_H = U_{1H} I_{1H} \approx U_{2H} I_{2H}, \quad (145)$$

где  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора по паспортным данным.

Измерить напряжение первичной обмотки, угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки трансформатора, напряжение вторичной обмотки трансформатора. Данные измерений занести в табл. 3.2.

Для того чтобы установить на входе трансформатора напряжение  $U_{1K}$ , необходимо изменять входное напряжение от 0 до того значения, при котором ток  $I_1 = I_{1H}$ ;

г) на основании опытных данных определить: напряжение короткого замыкания  $u_K$ ; мощность, потребляемую трансформатором  $P_{1K}$ ; мощность потерь в меди обмоток  $\Delta P_M$ ; мощность потерь в стали сердечника  $\Delta P_c$ .

Таблица 3.2

| Измерено        |                       |                | Вычислено           |           |                           |                      |                      |
|-----------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| $U_{1K}$ ,<br>В | $I_K = I_{1H}$ ,<br>А | $\varphi_{1K}$ | $\cos \varphi_{1K}$ | $u_K, \%$ | $P_{1K} = P_{KH}$ ,<br>Вт | $\Delta P_M$ ,<br>Вт | $\Delta P_c$ ,<br>Вт |
|                 |                       |                |                     |           |                           |                      |                      |

Напряжение короткого замыкания  $u_K$  определяется следующим образом:  $u_K = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\%$ .

При коротком замыкании полезная мощность трансформатора  $P_2 = 0$ . Следовательно, мощность, потребляемая им из сети в данном режим представляет собой потери

$$P_{1K} = \Delta P_c + \Delta P_{MH}, \quad (146)$$

где  $\Delta P_{MH}$  – мощность потерь в меди первичной и вторичной обмоток при номинальных токах  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$ :

$$\Delta P_{MH} = \Delta P_{M1H} + \Delta P_{M2H} = I_{1H}^2 R_1 + I_{2H}^2 R_2. \quad (147)$$

Так как напряжение  $U_K = (5,0 \div 10\%) U_{1H}$  очень мало, то и мощность потерь в стали  $P_c \equiv U_1^2$  в данном опыте будет незначительна и ею можно пренебречь. Следовательно, в этом случае можно принять  $P_{1K} = \Delta P_{MH} = P_{KH}$ .

#### 4. Работа трансформатора под нагрузкой:

а) подобрать электроизмерительные приборы для испытания трансформатора под нагрузкой;

б) собрать схему для проведения испытания трансформатора под нагрузкой (рис. 3.14);

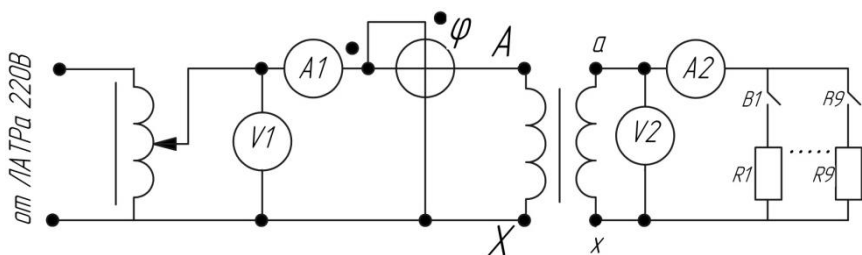


Рис. 3.14. Схема трансформатора при работе под нагрузкой

в) установить на первичной обмотке трансформатора напряжение  $U_1 = U_{1H}$ . Изменяя ток вторичной обмотки с помощью тумблеров, расположенных на панели стенда от 0 до  $1,2I_{2H}$  измерить: угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки трансформатора, токи обмоток, напряжение вторичной обмотки трансформатора;

Данные эксперимента занести в табл. 3.3;

г) на основании полученных данных определить: полезную мощность трансформатора  $P_2$ ; мощность, потребляемую трансформатором из сети  $P_1$ ; потери мощности трансформатора  $\Delta P_{\Sigma}$ ; мощность потерь в стали сердечника  $\Delta P_c$ ; мощность потерь в меди обмоток  $\Delta P_m$ ; КПД трансформатора  $\eta$  прямым методом ( $\eta$ ) и по данным опытов холостого хода и короткого замыкания ( $\eta'$ ); коэффициент нагрузки  $\beta_{opt}$ , при котором КПД максимален.

Мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора определяются как

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (148)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad (149)$$

так как нагрузка трансформатора носит чисто активный характер, то  $\cos \varphi_2 = 1$ .

Таблица 3.3

| п/п | Измерено              |                       |                |                       |                       | Вычислено         |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
|-----|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---|---|----|
|     | U <sub>1</sub> ,<br>В | I <sub>1</sub> ,<br>А | φ <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> ,<br>В | I <sub>2</sub> ,<br>А | cosφ <sub>1</sub> | P <sub>1</sub> ,<br>Вт | P <sub>2</sub> ,<br>Вт | ΔP <sub>Σ</sub> ,<br>Вт | ΔP <sub>м</sub> ,<br>Вт | ΔP <sub>с</sub> ,<br>Вт | β | η | η' |
| 1   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
| 2   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
| 3   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
| 4   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
| 5   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
| 6   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
| 7   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
| 8   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |
| 9   |                       |                       |                |                       |                       |                   |                        |                        |                         |                         |                         |   |   |    |

Суммарная мощность потерь трансформатора

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2. \quad (150)$$

Мощность потерь в меди обмоток трансформатора

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P_{\text{сн}}, \quad (151)$$

где  $\Delta P_{\text{сн}}$  – номинальная мощность потерь в стали сердечника (при  $U_1 = U_{1\text{н}}$ ).

КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (152)$$

В номинальном режиме работы постоянные потери в стали сердечника  $\Delta P_{\text{сн}}$  обозначают  $P_{10}$ , переменные потери в меди обмоток  $\Delta P_{\text{мн}} - P_{\text{кн}}$ , тогда КПД можно представить как

$$\eta' = \frac{P_2}{P_2 + P_{10} + \beta^2 P_{\text{кн}}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{сн}} + \beta^2 \Delta P_{\text{мн}}} \quad (153)$$

д) построить в одной системе координат характеристики:  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $\cos\varphi_1$ ,  $\eta'$ ,  $U_2 = f(P_2)$ .

Основные характеристики трансформатора имеют вид, показанный на рис. 3.15.

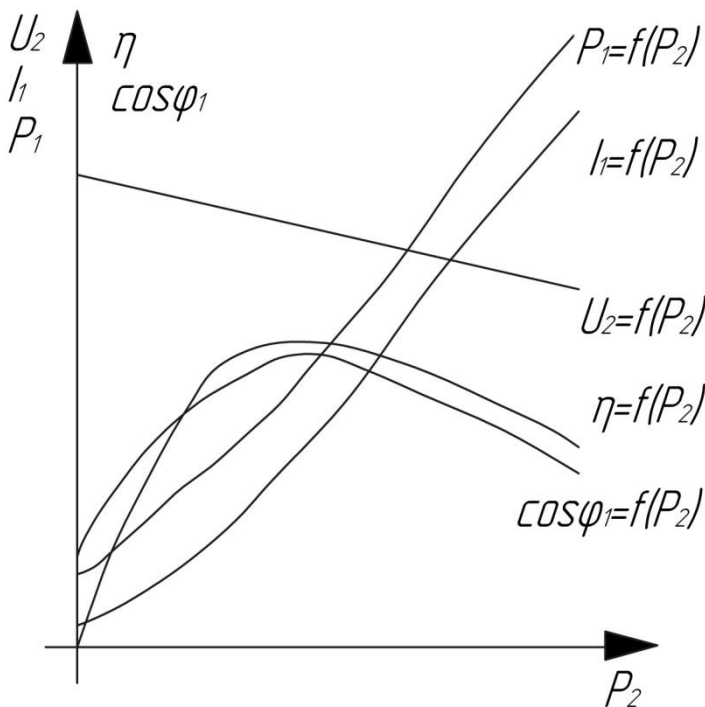


Рис. 3.15. Характеристики трансформатора

5. Произвести анализ результатов испытания трансформатора в различных режимах и сделать соответствующие выводы.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Объясните устройство и принцип действия испытуемого трансформатора.

2. Уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмоток трансформатора.

3. Определение коэффициента трансформации.

4. Объясните порядок проведения и принцип выбора приборов для выполнения опыта холостого хода, короткого замыкания, для испытания трансформатора под нагрузкой.

5. В чём отличие опыта короткого замыкания от аварийного режима короткого замыкания?

6. Какие величины определяются по данным опыта холостого хода, короткого замыкания и испытания трансформатора под нагрузкой? Объясните смысл и изменение этих величин.

7. Потери мощности и коэффициент полезного действия трансформатора.

8. Объясните смысл величин, указанных в паспорте трансформатора.

9. Определение коэффициента нагрузки, при котором к.п.д. имеет максимальное значение.

10. Внешняя характеристика трансформатора и её построение.

11. Рабочие характеристики трансформаторов.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ**

Цель работы: изучить устройство и принцип действия однофазного выпрямителя; исследовать работу выпрямителя без фильтра и с емкостным фильтром в режимах холостого хода и под нагрузкой.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

#### **СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**

Преобразовательные устройства используются для управления электрической энергией, подводимой из сети, а именно её видом, количеством, качеством, с целью регулирования режимов работы различных электротехнических и электронных устройств.

Управление – это процесс регулирования по необходимому закону одной или нескольких величин, таких как, например, напряжение, ток, ЭДС и т.д.

Различают два способа управления:

- параметрический – способ управления осуществляется с помощью изменения параметров цепей (активных и реактивных сопротивлений). Характеризуется низким КПД и дискретностью;

- энергетический – способ управления осуществляется с помощью регулирования количества и качества подводимой электрической энергии.

К преобразователям, реализующим энергетический способ управления, относятся электромашинные, электромагнитные и полупроводниковые. Первые два вида преобразователей имеют очевидные технические недостатки и

в настоящее время применяются крайне редко. Полупроводниковые представляет собой совокупность преобразователей электрической энергии, в основе которых лежат схемы с использованием полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров, транзисторов).

В любом полупроводниковом преобразователе (ПП) выделяют две составные части:

- силовую часть, в которой осуществляются все основные энергетические преобразования и передача энергии от первичного источника к нагрузке;
- систему управления, в которой формируются сигналы управления работой силовых регулирующих элементов.

Через силовую часть осуществляется основной процесс передачи энергии, то ее составные элементы (активные регулирующие – транзисторы или тиристоры; энергоемкие элементы – трансформаторы, реакторы и конденсаторы сглаживающих фильтров) имеют относительно большую установленную мощность и определяют габариты всего ПП. В системе управления происходит информационная обработка сигналов. Поэтому выделяющиеся в её элементах мощности и, следовательно, габариты значительно меньше, чем в силовой части.

Все ПП как преобразователи параметров электрической энергии можно классифицировать по целому ряду признаков.

Выпрямитель – это электротехническое устройство, предназначенное для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока. Выпрямители делятся на неуправляемые, которые осуществляют только преобразование знака напряжения, и управляемые, которые преобразуют не только знак, но и уровень напряжения.

Управляемые выпрямители строятся по принципу фазового управления, суть которого заключается в том, что из выходного напряжения неуправляемого выпрямителя вырезаются участки синусоиды.



Фазовый способ управления делится на три вида:

- фазопаздывающий — регулирование выходного напряжения осуществляется путем задержки момента включения связи между сетью и нагрузкой по сравнению с неуправляемым выпрямителем ( $\alpha$  — угол управления), а момент прерывания связи является функцией схемы и нагрузки;
- фазоопережающий;
- фазоизбирательный — любой из фрагментов синусоиды может быть вырезан.

Наиболее целесообразным является фазопаздывающий метод, так как он логически соответствует режиму работы силового ключа тиристора, который открывается системой управления, а закрывается нулем тока.

Выпрямитель можно представить в виде структурной схемы (рис. 4.1), в которую входят: силовой трансформатор, вентильный блок (выпрямитель), фильтрующее устройство, стабилизатор, цепь нагрузки. Стабилизатор постоянного напряжения обеспечивает постоянство напряжения на нагрузке. В зависимости от требований, предъявляемых к выпрямителю, отдельные блоки его могут отсутствовать. В первую очередь это относится к стабилизатору и фильтру.

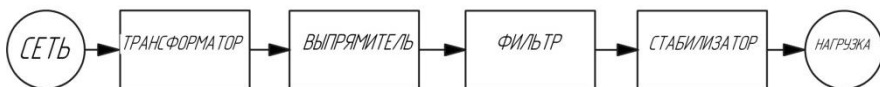


Рис. 4.1. Структурная схема выпрямителя

Силовой трансформатор служит для согласования входного и выходного напряжений выпрямителя. Возможны различные схемы соединения обмоток трансформатора в соответствии с различными схемами выпрямления. Напряжение вторичной обмотки трансформатора  $U_2$  определяет значение выпрямленного напряжения  $U_n$  (или  $U_d$ ).

Трансформатор позволяет одновременно гальванически развязать питающую сеть с параметрами  $U_1$ ,  $I_1$  с частотой  $f_1$ , и цепь нагрузки с параметрами  $U_n$ ,  $I_n$  (или  $U_d$ ,  $I_d$ ). В настоящее время разрабатываются и изготавливаются высоковольтные инверторы, работающие на высокой частоте и при непосредственном выпрямлении напряжения сети, поэтому используются бестрансформаторные схемы выпрямления, в которых вентильный блок присоединяется непосредственно к первичной питающей сети.

Вентильный блок (выпрямитель) выпрямляет переменный ток, подключая вторичное напряжение соответствующей фазы трансформатора к цепи постоянного тока. В вентильном блоке используются, как правило, полупроводниковые диоды или сборки на их основе. На выходе вентильного блока получают знакопостоянное напряжение с высоким уровнем пульсаций, определяемым только числом фаз питающей сети и выбранной схемой выпрямления.

Фильтрующее устройство обеспечивает требуемый уровень пульсаций выпрямленного тока в цепи нагрузки, в качестве которого применяются последовательно включаемые резистор или сглаживающий дроссель и параллельно включаемые конденсаторы. Фильтрующее устройство может строиться и по более сложным схемам. В выпрямителях малой мощности установка резистора или дросселя не обязательна. При использовании многофазных (чаще всего трехфазных) схем выпрямления уровень пульсаций естественно снижается, и облегчаются условия работы фильтра.

Полупроводниковые выпрямители можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) по выходной мощности:
  - маломощные – до 600 Вт,
  - средней мощности – до 100 кВт;
  - большой мощности – более 100 кВт);
- 2) по числу фаз источника:

- однофазные;
- многофазные;

3) по пульсности выпрямителя, определяемой числом полупериодов протекания тока во вторичной обмотке трансформатора за полный период напряжения  $U_1$ ;

4) по числу знакопостоянных импульсов в кривой выпрямленного напряжения за период питающего напряжения:

- однополупериодные;
- двухполупериодные;
- $m$ -полупериодные.

Выпрямители могут быть построены на управляемых вентилях (тиристорах, транзисторах) – управляемые выпрямители и на неуправляемых вентилях (диодах) – неуправляемые выпрямители.

Для работы и расчета выпрямителя принципиальное значение имеет характер нагрузки включенной на выходе выпрямителя. Различают следующие режимы работы выпрямителя:

- на активную нагрузку;
- на активно-индуктивную нагрузку;
- на активно-емкостную нагрузку;
- на нагрузку с противо-ЭДС.

Разные формы потребляемых из сети токов и их продолжительность при различном характере нагрузки выпрямителя приводит к тому, что методы расчетов выпрямителей существенно различаются.

Расчет выпрямителя сводится к выбору схемы выпрямления, типа диодов, определению электромагнитных нагрузок на обмотках трансформатора, диодах и элементах сглаживающего фильтра, а также энергетических показателей.

Выбор схемы выпрямителя зависит от ряда факторов, которые должны учитываться в зависимости от требований, предъявляемых к выпрямительному устройству. К ним

относятся:

- величины выпрямленного напряжения и мощности;
- частота и величина пульсации выпрямленного напряжения;
- число диодов и величина обратного напряжения на них;
- коэффициент полезного действия (КПД);
- коэффициент мощности и другие энергетические показатели.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Нелинейные элементы являются основными элементами силовой электроники. К ним относятся в первую очередь диоды, вольтамперные характеристики которых имеют два явно выраженных состояния: включенное, соответствующее высокой проводимости, и выключенное, соответствующее низкой проводимости. Для изготовления силовых полупроводниковых приборов, как правило, применяют кремний, имеющий кристаллическое строение, для которого характерно закономерное и упорядоченное расположение атомов в пространстве. Атом кремния является элементом четвертой группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева и имеет четыре валентных электрона. Эти четыре электрона образуют ковалентные связи с четырьмя соседними атомами кремния.

При комнатных температурах часть электронов приобретает энергию достаточную для разрыва межатомных связей, которая позволяет им осуществить переход из заполненной валентной зоны в зону проводимости, и получить возможность свободно перемещаться по кристаллу. Эти электроны обуславливают электронную проводимость в полупроводниках, или проводимость n-типа.

Образовавшаяся при отрыве электрона незаполненная связь (дырка) может быть занята электроном другой связи, что

вызовет появления незаполненной связи в новой точке кристалла. Таким образом, вакантное место (дырка) может перемещаться по кристаллу.

В электрическом поле перемещение электрона и дырки приобретает направленный характер. Дырка движется к отрицательному полюсу источника и переносит заряд равный заряду электрона. Но скорость перемещения дырки в несколько раз меньше скорости перемещения электрона. Дырки обуславливают дырочную проводимость в полупроводниках, или проводимость р-типа.

При разрыве каждой межатомной связи кристаллической решетки образуется пара «электрон-дырка», поэтому в любой момент времени концентрация тех и других носителей одинакова. При комнатной температуре в слабых электрических полях электропроводность полупроводникового материала на много ниже электропроводности металлов, но она выше, чем у диэлектриков. Поэтому эти материалы получили название полупроводники.

Проводимость полупроводника можно значительно повысить, если в первоначально чистое вещество добавить небольшое количество другого вещества. Электропроводность примесных полупроводников значительно выше электропроводности чистых материалов, так как концентрация носителей (основных носителей) в них определяется концентрацией примеси.

Основой силового полупроводникового диода является р-п переход, образующийся в пластине монокристаллического кремния между двумя слоями различной электропроводности (один – электронной, другой – дырочной).

Таким образом, полупроводниковым диодом называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим р-п переходом, имеющим два вывода.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным р-п переходом и его условное графическое обозна-

чение приведены на рис. 4.2.

Буквами р и п обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно р-типа и п-типа. В контактирующих слоях полупроводника (область р-п-перехода на рис. 4.2) имеет место диффузия дырок из слоя р в слой п, причиной которой является то, что их концентрация в слое р значительно больше их концентрации в слое п.

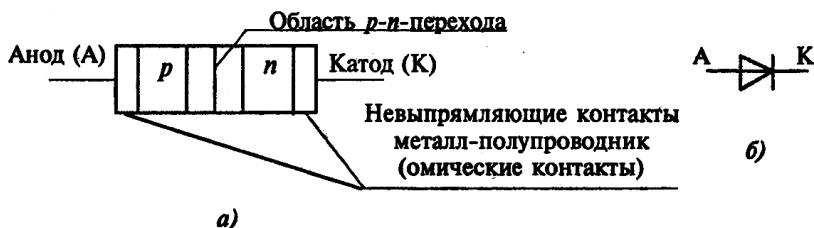


Рис. 4.2. а) схема структуры полупроводникового диода, б) графическое обозначение полупроводникового диода [8]

В итоге в приграничных областях слоя р и слоя п возникает так называемый обедненный слой, в котором мала концентрация подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Обедненный слой имеет большое удельное сопротивление. Ионы примесей обедненного слоя не компенсированы дырками или электронами. В совокупности ионы образуют некомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью  $E$ .

Это поле препятствует переходу дырок из слоя р в слой п и переходу электронов из слоя п в слой р. Оно создает так называемый дрейфовый поток подвижных носителей заряда, перемещающий дырки из слоя п в слой р и электроны из слоя р в слой п.

Таким образом, в зависимости от полярности проходящего через диод тока, проводимость диода существенно изменяется, приводя к изменению величину проходящего тока.

Основные характеристики полупроводникового диода

представляются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Вольт-амперная характеристика – это зависимость тока  $i$ , протекающего через диод, от напряжения  $u$ , приложенного к диоду.

Вольт-амперной характеристикой называют и график этой зависимости (рис. 4.3).

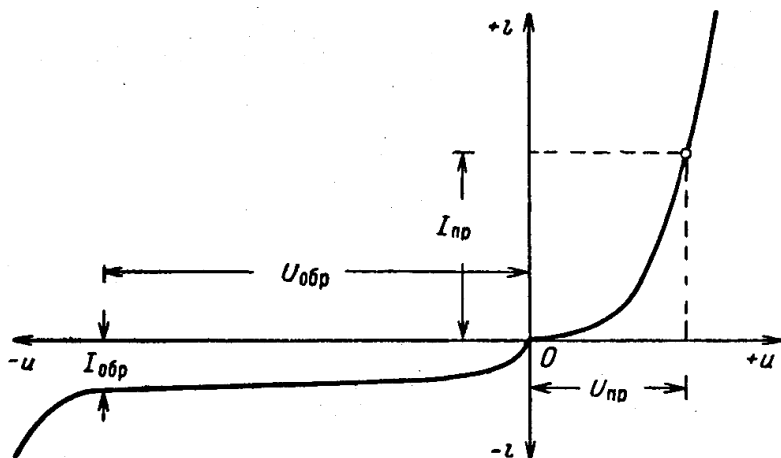


Рис. 4.3. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода [8]

Диоды обычно характеризуются следующими параметрами (рис. 4.3):

- 1) обратный ток при некоторой величине обратного напряжения  $I_{обр}$ , мкА;
- 2) максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр}$ , В;
- 3) падение напряжения на диоде при некотором значении прямого тока через диод  $U_{пр}$ , В;
- 4) максимально допустимый прямой ток  $I_{пр}$ , А;
- 5) емкость диода при подаче на него обратного напряжения некоторой величины  $C$ , пФ;
- 6) диапазон частот, в котором возможна работа без снижения выпрямленного тока  $f_{гр}$ , кГц;

7) рабочий диапазон температур.

При прямом включении диода (потенциал анода выше потенциала катода) через p-n переход возникает прямой ток  $I_{пр}$  (рис. 4.4, а).

Сопротивление перехода при этом очень мало (переход открыт), и падение напряжения на диоде  $U_{пр}=0,2-0,7$  В, в зависимости от материала полупроводника p-n перехода.

При обратном включении диода (рис. 4.4, б) сопротивление p-n перехода велико, ток через него (обратный ток  $I_{обр}$ ) мал: он обусловлен неосновными носителями заряда. В этом случае p-n переход считают закрытым.

Таким образом, диод обладает ярко выраженными вентильными свойствами.

При обратном напряжении, превышающем пробивное значение, происходит лавинный (электрический) пробой p-n перехода, при этом резко увеличивается обратный ток  $I_{обр}$  (см. ВАХ диода рис. 4.3).

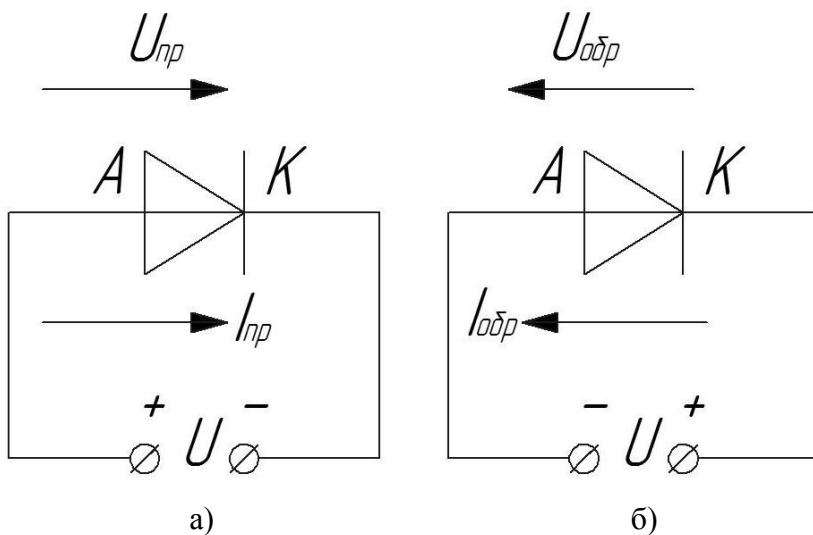


Рис. 4.4. а) прямое включение диода,  
б) обратное включение диода



Далее рассмотрим наиболее распространенные схемы выпрямления.

## ОДНОФАЗНЫЙ ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Рассмотрим работу однофазного однополупериодного выпрямителя, схема выпрямления которого содержит один диод и представлена на рис. 4.5. Вход схемы подключается к вторичной обмотке трансформатора, а к выходным клеммам схемы подключается нагрузка.

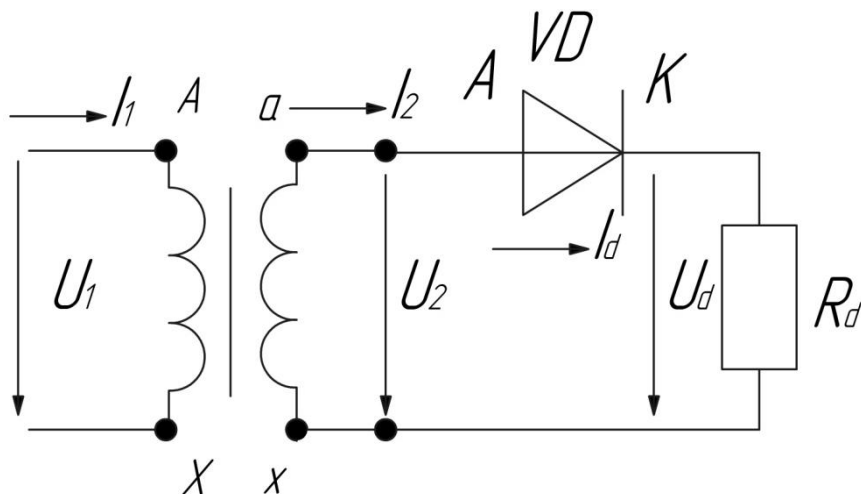


Рис. 4.5. Схема однофазного однополупериодного  
выпрямителя

Напряжение на входе схемы выпрямления синусоидальное, мгновенное значение которого определяется как

$$u_2 = U_{2m} \sin \omega t, \quad (154)$$

где  $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$  – амплитуда напряжения вторичной об-

мотки трансформатора;

$U_2$  – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора;

$\omega = 2\pi f$  – круговая частота сети,

$f$  – линейная частота сети.

При положительном значении напряжения на аноде диода относительно катода во вторичной цепи трансформатора будет протекать ток, являющийся для диода прямым.

При отрицательном напряжении на аноде относительно катода к диоду будет приложено обратное напряжение, а ток в цепи будет равен обратному току диода, что показано на рис. 4.6.

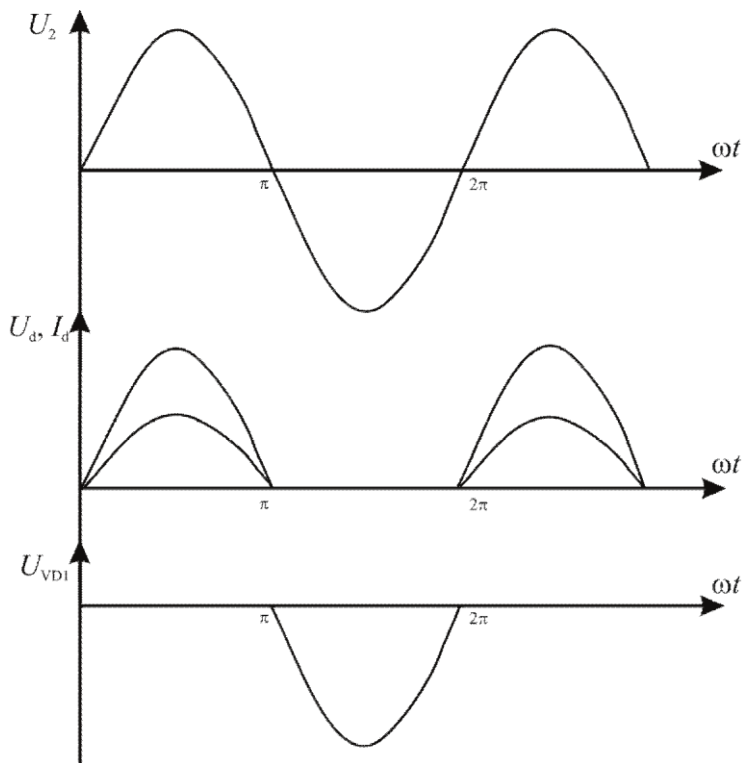


Рис. 4.6 [9]

Мгновенное значение выпрямленного тока имеет вид:

$$\begin{cases} i_d = i_2 = \frac{U_{2m} \sin(\omega t)}{(R_d + R_a)}, & \text{при } 0 < \omega t < \pi; \\ i_d = i_2 = i_{\text{обр}} \approx 0, & \text{при } \pi < \omega t < 2\pi. \end{cases} \quad (155)$$

где  $i_d$ ,  $i_2$ ,  $i_{\text{обр}}$  – мгновенные значения выпрямленного тока, тока вторичной обмотки, и обратного тока диода;

$R_d$  – сопротивление нагрузки;

$R_a$  – сопротивление анодной цепи, включающее, активное сопротивление обмоток трансформатора, сопротивление проводов и диода.

Мгновенное значение выпрямленного напряжения в любой момент времени меньше мгновенного значения напряжения вторичной обмотки трансформатора, так как часть напряжения теряется на сопротивлении  $R_a$ .

Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{dm} \sin(\omega t) d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{2m} \eta_a \sin(\omega t) d\omega t = \\ &= \frac{U_{2m} \eta_a}{2\pi} = \frac{\sqrt{2} U_2 \eta_a}{\pi} \approx 0.45 U_2 \eta_a, \end{aligned} \quad (156)$$

где  $U_{dm}$  – амплитудное значение выпрямленного напряжения;

$$\eta_a = \frac{R_d}{(R_d + R_a)} - \text{коэффициент анодной цепи.}$$

Среднее значение выпрямленного тока в этой схеме равно среднему значению тока диода:

$$I_d = I_{\text{вср}} = \frac{U_d}{R_d} = \frac{I_{dm}}{\pi}, \quad (157)$$

$I_{dm} = I_{vm} = \frac{U_{2m}}{R_a + R_d}$  – амплитудное значение выпрямленного тока (тока диода).

Максимальное обратное напряжение на диоде достигает амплитудного значения напряжения вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{\text{обр.м}} = U_{2\text{м}} = \frac{U_d \pi}{\eta_a}. \quad (158)$$

При расчете выпрямителя заданным параметром являются значения постоянного напряжения и сопротивления нагрузки. Диод выбирается по среднему значению тока диода, амплитудному значению тока диода и максимальному обратному напряжению.

Согласно полученным выражениям диод должен выдерживать амплитудные значения тока и обратного напряжения как минимум в  $\pi$  раз превышающие средние значения тока и напряжения нагрузки.

Основная гармоника переменной составляющей выпрямленного напряжения и тока имеет частоту равную частоте сети.

Для удобства вычисления амплитуды основной гармоники пульсаций выберем начало координат в точке, где напряжение имеет максимальное значение. Тогда мгновенное значение напряжения на диоде в диапазоне  $-\frac{\pi}{2} < \omega t < \frac{\pi}{2}$  можно представить как функцию следующего вида:

$$u_d = U_{\text{dm}} \cos(\omega t). \quad (159)$$

Так как эта функция четная, то при разложении её в ряд Фурье останутся только косинусоидальные члены. Амплитуда первой гармоники напряжения определяется как:

$$\begin{aligned} U_{(1)\text{м}} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} u_d \cos(\omega t) d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} U_{\text{dm}} \cos^2(\omega t) d\omega t = \\ &= \frac{U_{\text{dm}}}{2} = \frac{U_d \pi}{2}. \end{aligned} \quad (160)$$

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения по первой гармонике:

$$K_{(1)\Pi} = \frac{U_{(1)m}}{U_d} = \frac{\pi}{2}. \quad (161)$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора равно:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_{dm}^2 \sin^2(\omega t) d\omega t} = \frac{I_{dm}}{2} = \frac{I_d \pi}{2}. \quad (162)$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора равно:

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{U_d \pi}{\sqrt{2} \eta_a} \approx 2.22 \frac{U_d}{\eta_a}. \quad (163)$$

Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора равна:

$$S_2 = U_2 I_2 = \frac{\pi^2 U_d I_d}{2\sqrt{2} \eta_a} \approx 3.49 \frac{P_d}{\eta_a}. \quad (164)$$

где  $P_d = U_d I_d$  – мощность, отдаваемая в нагрузку.

Мгновенное значение тока первичной обмотки определяется из уравнения магнитного равновесия трансформатора:

$$i_1 = \frac{-w_2(i_2 - I_d)}{w_1} = -k \cdot i_2, \quad (165)$$

где  $w_1, w_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора;

$k = \frac{w_2}{w_1}$  – коэффициент трансформации трансформатора.

Из последнего выражения следует, что временная диаграмма первичного тока трансформатора подобна диаграмме вторичного тока, если исключить из него постоянную составляющую  $I_d$ .

Действующее значение тока первичной обмотки определяется как:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{k^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_2 - I_d)^2 d\omega t} =$$

$$= \frac{\sqrt{\pi^2 - 4}}{2} kI_d \approx 1.21kI_d. \quad (166)$$

Расчетная мощность первичной обмотки равна:

$$S_1 = U_1 I_1 = \frac{U_2}{k} \frac{\sqrt{\pi^2 - 4}}{2} kI_d = \frac{\pi}{\sqrt{2}\eta_a} \frac{\sqrt{\pi^2 - 4}}{2} kI_d \approx 2.69 \frac{P_d}{\eta_a}. \quad (167)$$

Полная расчетная мощность трансформатора равна:

$$S_{тр} = \frac{S_1 + S_2}{2} = 3,09 \frac{P_d}{\eta_a}. \quad (168)$$

Коэффициент использования трансформатора по мощности определяется как:

$$K_{тр} = \frac{P_d}{S_{тр}} \approx 0,324\eta_a. \quad (169)$$

В сердечнике трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки создается добавочный постоянный магнитный поток, насыщающий сердечник.

Это явление называют вынужденным намагничиванием сердечника трансформатора.

В результате насыщения намагничивающий ток трансформатора возрастает в несколько раз по сравнению с током в нормальном режиме работы.

Это обуславливает увеличение сечения провода обмоток, массы и габаритов трансформатора.

Однополупериодный выпрямитель применяется при выпрямленных токах до нескольких десятков миллиампер и в тех случаях, когда не требуется высокого качества выпрямленного напряжения.

Схема характеризуется большими пульсациями выпрямленного напряжения, наличием вынужденного намагничивания сердечника трансформатора и высоким коэффициентом использования трансформатора [9].

## ОДНОФАЗНЫЙ ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Однофазный мостовой выпрямитель состоит из двухобмоточного трансформатора и комплекта диодов VD1, VD2, VD3, VD4, а его схема показана на рис 4.7.

Переменное напряжение подводится к одной диагонали моста, а нагрузка подключается к другой его диагонали – между точкой соединения катодов двух диодов, образующих катодную группу (VD3, VD4) и точкой соединения анодов двух диодов, образующих анодную группу (VD1, VD2).

Диоды проводят ток попарно, в любой момент времени в проводящем состоянии находится та пара диодов, у которой анод диода катодной группы имеет положительный потенциал, а катод диода анодной группы – отрицательный потенциал.

Так, например, при положительной полуволне питающего напряжения ток нагрузки будет протекать через два диода VD1, VD4, а при отрицательной полуволне питающего напряжения через диоды VD3, VD2.

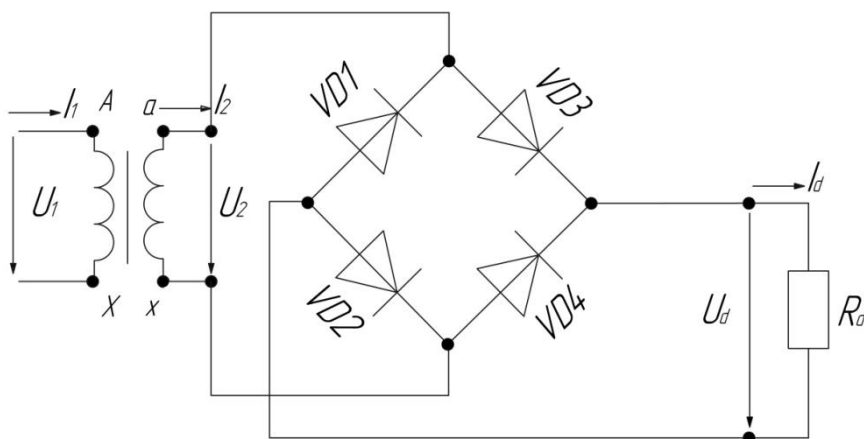


Рис. 4.7. Схема однофазного неуправляемого мостового выпрямителя

Из временных диаграмм, показанных на рис 4.8, видно, что ток в нагрузке протекает в течение обоих полупериодов переменного напряжения, а во вторичной обмотке трансформатора – дважды за период и при активной нагрузке имеет форму синусоиды. Ток в первичной обмотке синусоидален.

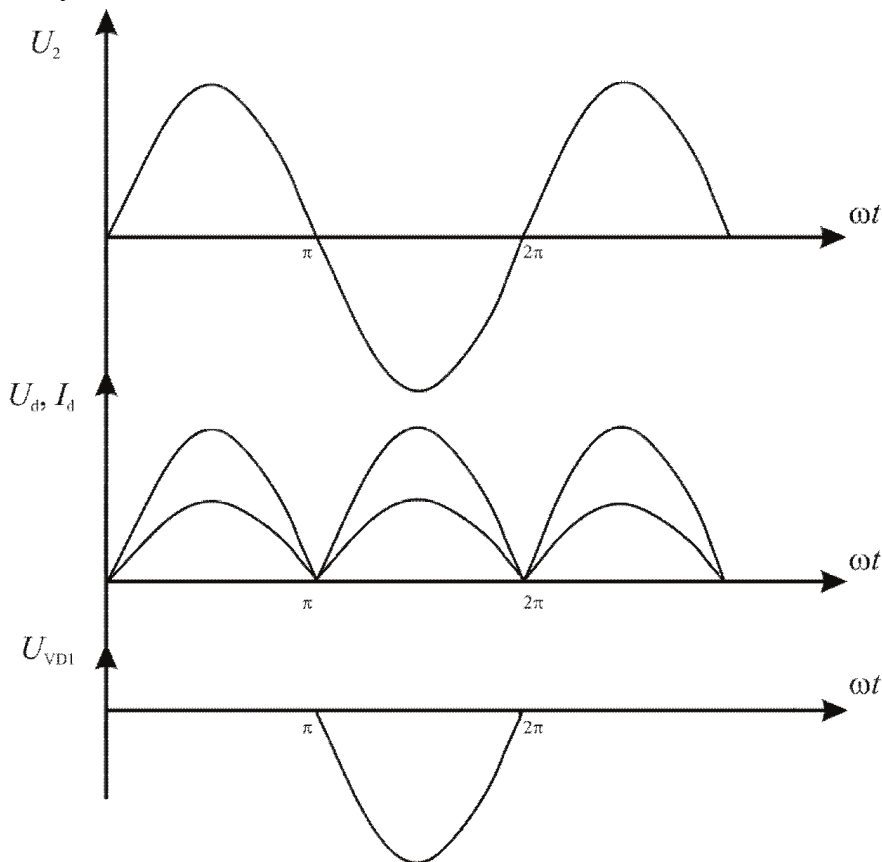


Рис. 4.8 [9]

Справедливы следующие соотношения между выпрямленным напряжением  $U_d$  и действующим значением напряжения  $U_2$



$$U_d = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2, \quad (170)$$

$$U_2 = \frac{\pi U_d}{2\sqrt{2}} \approx 1.11U_d.$$

Максимальное обратное напряжение на диоде равно амплитудному значению напряжения вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{\text{обр.м}} = U_{2\text{м}} = \frac{U_d \pi}{2\eta_a}. \quad (171)$$

Амплитуда первой гармоники напряжения определяется как:

$$U_{(1)\text{м}} = \frac{2U_d}{3}. \quad (172)$$

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения по первой гармонике:

$$K_{(1)\Pi} = \frac{U_{(1)\text{м}}}{U_d} = 0,67. \quad (173)$$

Среднее значение тока диода (анодной цепи)

$$I_a = \frac{I_d}{2}. \quad (174)$$

Ток в нагрузке протекает в течение обоих полупериодов переменного напряжения, как и ток во вторичной обмотке трансформатора имеющий форму синусоиды.

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{U_2}{R_d} = \frac{\pi U_d}{2\sqrt{2}R_d} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_d \approx 1.11I_d. \quad (175)$$

Ток в первичной обмотке

$$I_1 = \frac{I_2}{k} = \frac{\pi I_d}{2\sqrt{2}k} \approx 1.11 \frac{I_d}{k}. \quad (176)$$

Поскольку и в первичной, и во вторичной обмотке трансформатора протекает синусоидальный ток, отсутствует

вынужденное намагничивание сердечника трансформатора.

Расчетные мощности обмоток трансформатора и полная расчетная мощность трансформатора равны между собой:

$$S_{\text{тр}} = S_1 = S_2 = 1.23 \frac{P_d}{\eta_a}. \quad (177)$$

Схема имеет лучший из всех однофазных схем выпрямления коэффициент использования трансформатора по мощности равный:

$$K_{\text{тр}} = \frac{P_d}{S_{\text{тр}}} \approx 0,815 P_d. \quad (178)$$

Такая схема применяется при выпрямленных напряжениях от десятков до сотен вольт [9].

## СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Сглаживающие фильтры применяются для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения и тока. Основными элементами фильтров являются конденсаторы и индуктивные катушки (реакторы).

Простейший емкостный фильтр представляет собой конденсатор, включенный параллельно нагрузочному резистору, а простейший индуктивный фильтр – реактор, включенный последовательно с нагрузочным резистором.

Такие фильтры работают эффективно при  $X_C = \frac{1}{\omega C} \ll R_d$  и

$$X_L = \omega L \gg R_d.$$

Исходя из этого, емкостный фильтр применяют в маломощных выпрямителях (при больших значениях  $R_d$ ), а индуктивный – в выпрямителях средней и большой мощности (при малых значениях  $R_d$ ). Наряду с простыми, также применяют и многозвенные фильтры.

Уменьшение пульсаций сглаживающим фильтром объясняется шунтирующим действием конденсатора для

переменной составляющей выпрямленного напряжения и значительным падением этой составляющей напряжения на реакторе. Принцип действия сглаживающих фильтров заключается в накоплении энергии в реактивных элементах.

Рассмотрим принцип работы простейшего емкостного фильтра. В этом случае для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения параллельно нагрузке подключают конденсатор достаточно большой емкости, как показано на рис. 4.9.

В этом случае режим работы выпрямителя изменяется. Диоды открываются по очереди в те моменты времени, когда положительная полуволна напряжения  $U_2$ , приложенного к аноду диода, больше напряжения конденсатор (см. рис. 4.10).

Половину времени, в течение которого протекает ток через диод принято называть углом отсечки  $\Theta$ . В те моменты времени, когда диоды закрыты, происходит разряд конденсатора на нагрузку. В результате кривая выпрямленного напряжения получается сглаженной.

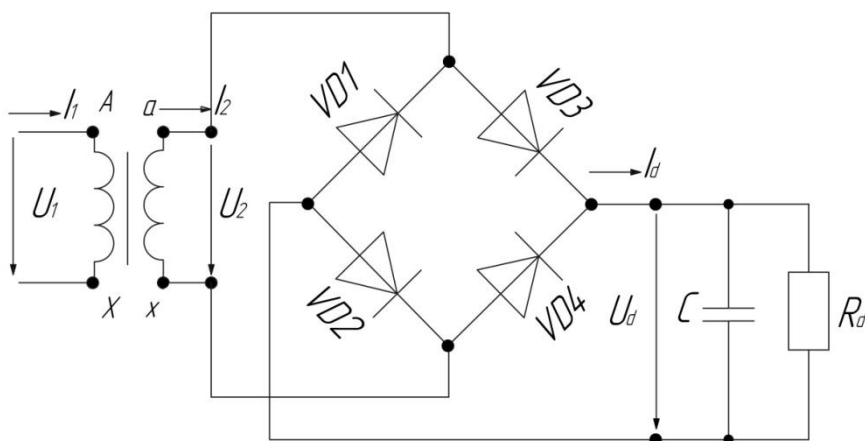


Рис. 4.9

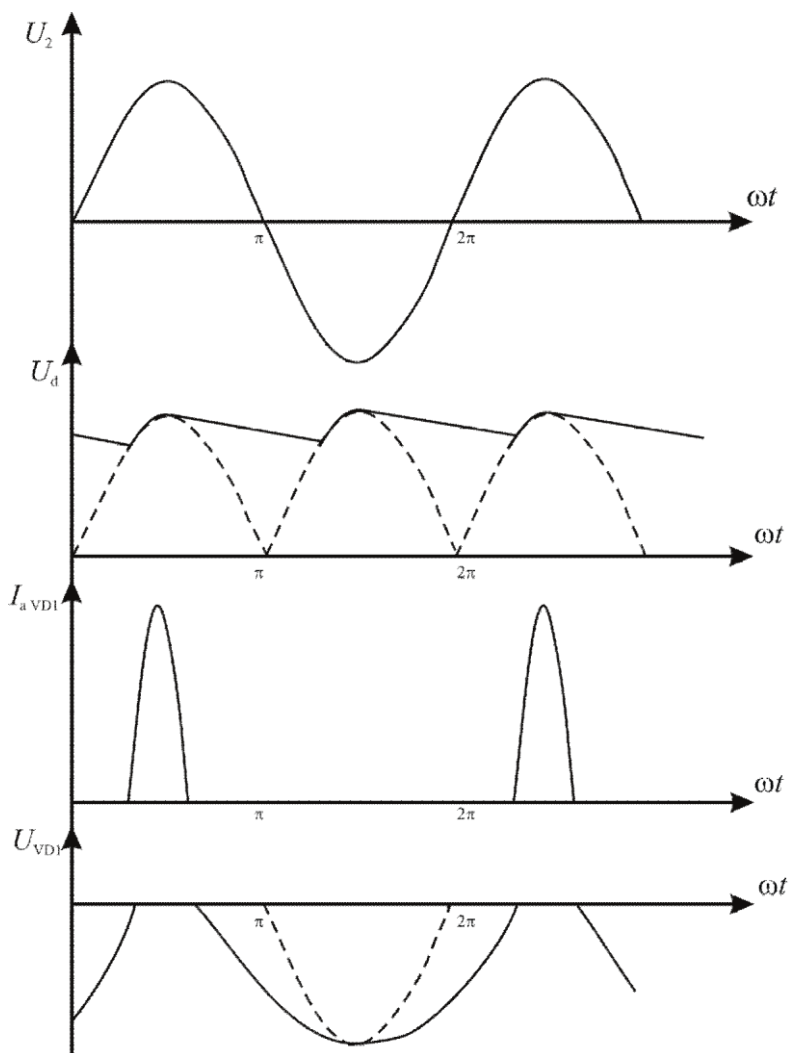


Рис. 4.10 [9]

Как правило, конденсатор подбирают таким образом, чтобы диоды находились в открытом состоянии примерно одну треть от времени закрытого состояния. В связи с чем,

амплитуда импульса тока через диоды и обмотки трансформатора в три, пять раз превышает ток через диоды при активно-индуктивной нагрузке. Данный режим является наиболее тяжелым для выпрямителя, поскольку происходит перегрузка диодов и обмоток трансформатора по току. Особенно опасен момент включения выпрямителя, так как время первоначальной зарядки конденсатора затягивается и возникающий при этом импульс тока может вывести из строя полупроводниковые приборы.

В однополупериодном выпрямителе применение такого фильтра, кроме описанных особенностей, приводит к увеличению максимального обратного напряжения прикладываемого к вентиллю, так как во время закрытого состояния к диоду прикладывается напряжение равное разности напряжения вторичной обмотки трансформатора и напряжения заряженного конденсатора [9].

## **ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ**

1. Изучить устройство и принцип действия однофазного выпрямителя для режимов холостого хода и под нагрузкой.
2. Определить минимальные и максимальные значения токов и напряжений для выбора измерительных приборов.
3. Подготовить таблицу для записи экспериментальных данных при исследовании выпрямителя в различных режимах.

## **ПРОГРАММА РАБОТЫ**

Объектом исследования является однофазный мостовой выпрямитель, схема которого собрана на диодах типа Д242. Максимально допустимые параметры диодов этого типа: обратное напряжение – 100В; среднее значение прямого тока – 5А. В качестве источника питания используется трансформатор, выходное напряжение которого  $U_2=18\text{В}$ .

Нагрузка выпрямителя носит активный характер, макси-

мальное сопротивление нагрузочного резистора 150 Ом, минимальное 13,5 Ом.

Схема лабораторной установки для исследования выпрямителя показана на рис. 4.11. Эта схема собрана на специальной плате и устанавливается на панели лабораторного стенда.

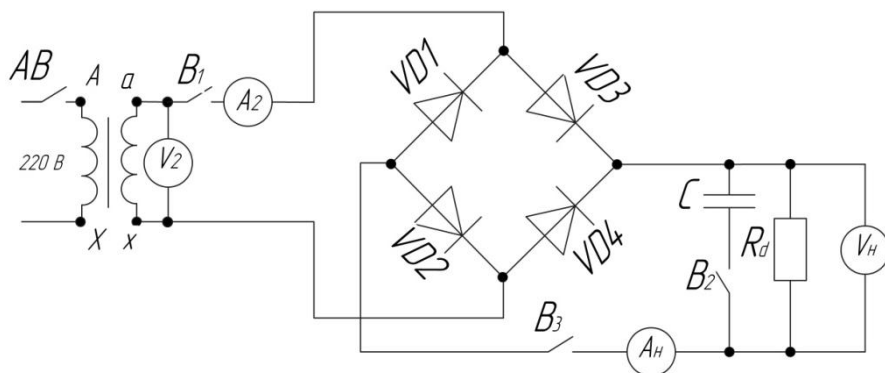


Рис. 4.11

1. Установить плату с исследуемой схемой на панель стенда. Подключить к ней измерительные приборы. Выбор приборов производится по роду тока и по величине пределов измерения. Переключатель на стенде установите в положение « $\sim$ ».

2. Исследовать работу выпрямителя в режиме холостого хода при работе без фильтра и с фильтром.

3. Поставьте переключатель около панели в положение « $\sim$ » и, изменяя нагрузку выпрямителя последовательным замыканием тумблеров, исследовать режим работы выпрямителя под нагрузкой при работе без фильтра и с фильтром. Результаты измерений по п.п. 2 и 3 занести в таблицу.

4. Снять осциллограммы напряжений  $u_2$ ,  $u_{VD}$ ,  $u_d$  на элементах выпрямителя, работающего в режиме нагрузки, при работе без фильтра и с фильтром.

5. Определить по опытным данным коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.

| Определяемые величины | Номер опыта ( $R=\text{var}$ ) |   |   |   |   |                   |   |   |   |   |
|-----------------------|--------------------------------|---|---|---|---|-------------------|---|---|---|---|
|                       | Работа без фильтра             |   |   |   |   | Работа с фильтром |   |   |   |   |
|                       | 1                              | 2 | 3 | 4 | 5 | 1                 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $U_2, \text{В}$       |                                |   |   |   |   |                   |   |   |   |   |
| $I_2, \text{А}$       |                                |   |   |   |   |                   |   |   |   |   |
| $U_d, \text{В}$       |                                |   |   |   |   |                   |   |   |   |   |
| $I_d, \text{А}$       |                                |   |   |   |   |                   |   |   |   |   |
| $U_{2m}, \text{В}$    |                                |   |   |   |   |                   |   |   |   |   |
| $K_{\Pi}$             |                                |   |   |   |   |                   |   |   |   |   |

6. Исследовать влияние емкостного фильтра на величину пульсаций выпрямленного напряжения.

7. Провести анализ полученных результатов и сделать соответствующие выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. По каким параметрам выбирают диоды для работы в схемах выпрямления?

2. Поясните вольтамперную характеристику диода и укажите на ней предельно допустимые значения прямого тока и обратного напряжения.

3. Объясните принцип работы однофазного мостового выпрямителя. Укажите его достоинства и недостатки.

4. Как определяется коэффициент пульсаций? Назовите его величину для различных схем выпрямления.

5. Как определяется ток, проходящий через диод в различных схемах выпрямления?

6. Объясните назначение емкостных фильтров.

7. Какие функции выполняет трансформатор в выпрямительной установке?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие содержит теоретический материал, необходимый для проведения лабораторных работ по курсу «Электротехника и электроника», а так же методические указания по их выполнению. Эта дисциплина является одной из основных общетехнических дисциплин, на которой основывается изучение многих специальных дисциплин студентами направлений подготовки 15.03.01 «Машиностроение» и 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Темы лабораторных работ, приведенных в пособии, охватывают практически важнейшие разделы изучаемого курса. Порядок проведения лабораторных работ соответствует порядку изучения перечисленных тем в курсе «Электротехника и электроника».

Данное учебное пособие поможет студентам самостоятельно готовиться к выполнению лабораторных работ, а также будет полезно при непосредственном выполнении работы и оформлении результатов эксперимента.

Лабораторный практикум также может использоваться студентами других специальностей, изучающих курсы «Электротехника», «Электроника», «Электротехника и электроника».



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усольцев, А. А. Общая электротехника [Текст]: учебное пособие / А. А. Усольцев. – СПб: НИУ ИТМО, 2009, – 301 с.
2. Попова, Т. В. Анализ линейных электрических цепей, электротехнических машин и аппаратов: лабораторный практикум: учебное пособие / Т. В. Попова, Д. А. Тонн. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 206 с.
3. Лекции для студентов технических вузов: [Электронный ресурс]: – Режим доступа: [http:// ChertovLektor.ru](http://ChertovLektor.ru).
4. Матюшенко, В. С. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи постоянного и однофазного синусоидального токов [Текст]: учебное пособие / В. С. Матюшенко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2002. – 111 с.
5. Корнилов, Г. П. Теоретические основы электротехники: Конспект лекций. Часть 1. [Текст]: учебное пособие / Г. П. Корнилов – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – 133 с.
6. Кононенко, А. В. Проектирование силовых трансформаторов для автоматизированных систем электроснабжения [Текст]: учебное пособие / А. В. Кононенко, Д. А. Тонн. – Воронеж: Издательство «Кварта», 2007. – 70 с.
7. Кононенко, Е. В. Электрические машины постоянного тока и трансформаторы [Текст]: учебное пособие / Е. В. Кононенко, К. Е. Кононенко, Ю. В. Писаревский. – Воронеж: Издательство «Кварта», 2002. – 112 с.
8. Шаньгин, Е.С. Основы электроники [Текст]: учебное пособие / Е. С. Шаньгин. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2007, – 168 с.
9. Лопатин, А. А. Преобразовательная техника. [Текст]: учебное пособие / А. А. Лопатин, В. Б. Молодецкий, А. В. Казанцев. – Красноярск: ИПЦ ПИ СФУ, 2007. – 51 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Введение.....                                                                                   | 3   |
| Указания по технике безопасности.....                                                           | 5   |
| Требования к подготовке и оформлению лабораторных работ.....                                    | 6   |
| Лабораторная работа № 1. Исследование электрических цепей постоянного тока.....                 | 7   |
| Контрольные вопросы.....                                                                        | 27  |
| Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы цепи однофазного синусоидального тока..... | 29  |
| Контрольные вопросы.....                                                                        | 75  |
| Лабораторная работа № 3. Исследование однофазного трансформатора.....                           | 77  |
| Контрольные вопросы.....                                                                        | 110 |
| Лабораторная работа № 4. Исследование однофазного неуправляемого выпрямителя.....               | 111 |
| Контрольные вопросы.....                                                                        | 135 |
| Заключение.....                                                                                 | 136 |
| Библиографический список.....                                                                   | 137 |

Учебное издание

**Тонн** Дмитрий Александрович

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА: ТЕОРИЯ И ЛАБОРАТОРНАЯ ПРАКТИКА**

Учебное пособие

Редактор Кулакова Н. В.

Подписано в печать 11.04.2019.

Формат 60х84 1/16.

Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 8,6. Тираж 350 экз. Заказ № 48.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

394026 Воронеж, Московский проспект, 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ

394026 Воронеж, Московский проспект, 14