

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**



**Кафедра «Электротехники»**

**Учебная дисциплина**

**Электротехника и электроника**

**Лекция**

**Основные понятия и  
определения. Классификация  
электрических цепей**

Кандидат военных наук, доцент Забуга Николай Владимирович

### Учебные вопросы:

1. Введение. Предмет и задачи дисциплины
2. Основные понятия электротехники
3. Основы топологии электрических цепей. Законы Кирхгофа.
4. Классификация электрических цепей

### Литература:

1. Зевеке Г.В., Ионкин А.В., Страков С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов, - М.: Энергоатомиздат, 1999 г, с. 9 –21.
2. 1. Борисов Ю. Н. и др. Электротехника: Учеб. для неэлектротехнических специальностей вузов/ Ю. Н. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. 2-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Энергоиздат, 1985. – 552 с.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебник для вузов, - М.: Высшая школа, 2003 г, с. 2 –21.

Предметом изучения дисциплины «Электротехника и электроника» являются избранные положения электротехники, а также основные типы электронных устройств, их характеристики и принципы построения электронных схем.

Целью изучения дисциплины «Электротехника и электроника» - формирование у студентов специальной базы знаний по основным направлениям использования электротехнических и электронных устройств в сфере своей деятельности.

Дисциплина "Электротехника и электроника" содержит три части: Электрические и магнитные цепи; Основы электроники; Электрические машины и аппараты, электропривод и электроснабжение. В результате их изучения студент должен: усвоить основные понятия, законы, принципы действия, назначение и области применения типовых устройств; понимать сущность процессов в электрических и магнитных цепях, электронных устройствах, а также электрических машинах и аппаратах; приобрести навыки чтения простейших электрических схем; научиться проводить оценки режимов работы установок и выбор параметров оборудования.

Электротехника и электроника - это науки, в которых рассматривается практическое применение электромагнитных явлений для преобразования энергии, информации и вещества.

**Электротехника** изучает процессы и устройства для производства, передачи, преобразования и применения электрической энергии. В электротехнических устройствах используют процессы, сопровождающие протекание тока в проводниках. Электрическая энергия потребляется во всех отраслях народного хозяйства, при научных исследованиях, в быту. Электрификация промышленности стала основой механизации и автоматизации технологических процессов.

**Электроника** изучает практическое применение электромагнитных процессов в вакууме, газах, полупроводниках. Эти процессы отличаются высокой управляемостью и возможностью разнообразных взаимных преобразований. Электронные устройства стали основой систем управления технологическими процессами, а также информатизации производства.

**Электротехнические и электронные устройства**, в которых использованы процессы одной и той же физической природы, сравнительно просто согласуются друг с другом. Причем электротехнические устройства обычно служат средствами преобразования энергии, а электронные - средствами управления.

Электротехника и электроника - это науки, в которых рассматривается практическое применение электромагнитных явлений для преобразования энергии, информации и вещества.

Электрические и магнитные явления, известные с древности, одним из первых начал изучать У. Гильберт, издавший об этом книгу еще в 1600 г. Значительный вклад в представление об этих явлениях внесли М. В. Ломоносов, Б. Франклин и др. Электротехника, как наука, начинается с открытия в 1831 г. М. Фарадеем закона электромагнитной индукции. Основы этой науки были заложены также трудами А. М. Ампера, Г. Х. Эрстеда, Г. Р. Кирхгофа, Г. С. Ома, Э. Х. Ленца. Теорию электромагнетизма в 1873 г. обобщил Дж. К. Максвелл.

Память великих ученых увековечена в названиях размерностей ряда величин.

Одновременно изучались разнообразные действия тока и магнитного поля. Расширялось практическое применение знаний об электромагнитных явлениях. Первыми источниками электрической энергии служили химические батареи (А. Вольта, В. В. Петров). В 1838 г. Б. С. Якоби с помощью двигателя постоянного тока преобразовал электрическую энергию такого источника в механическую энергию, передаваемую гребному винту шлюпки. З. Т. Грамм в 1870 г. разработал машинный генератор постоянного тока, в котором в электрическую энергию преобразовывалась механическая.

Цепи переменного тока в 1876 г. были впервые применены П. Н. Яблочковым. В этих цепях протекали процессы производства энергии переменного тока и ее распределения с помощью трансформаторов между осветительными приборами. Трансформаторы затем были усовершенствованы О. Блати, М. Перном и др.

В 1891 г. М. О. Доливо-Добровольский построил цепь трехфазного тока, состоящую из генератора, трансформатора, линии передачи и асинхронного двигателя.

Электромагнитные явления осваивались в новых технологических процессах. Особо следует отметить электросварку, разновидности которой изобретены Н. Г. Славяновым и Н. Н. Бенардосом.

В России преподавание электротехники в ВУЗах началось в 1904-05 гг. почти одновременно в С.-Петербурге (В. Ф. Миткевич) и в Москве (К. А. Круг). Первая отечественная книга по электротехнике - вышедшая в 1916 г. работа К. А. Круга "Основы электротехники".

К началу XX в. можно отнести и рождение электроники, в которой явления электромагнетизма использовались в разнообразных средах и на их границах. С помощью электронных устройств стало возможным преобразование видов электрической энергии.

На рубеже XIX-XX вв. началась широкая электрификация развитых стран.

Электрическая энергия в сравнении с другими формами обладает рядом достоинств. Ее передача на расстояние по проводам не сопровождается переносом вещества. Устройства для прямого и обратного преобразования электрической энергии в иные формы (механическую, тепловую, лучистую и другие) отличаются простотой, высокими КПД и другими технико-экономическими показателями. Однако электрическую энергию пока еще нельзя накапливать в больших количествах, а при использовании электроустановок требуется строжайшее соблюдение техники безопасности.

Электротехника изучает процессы и устройства для производства, передачи, преобразования и применения электрической энергии. В электротехнических устройствах используют процессы, сопровождающие протекание тока в проводниках. Электрическая энергия потребляется во всех отраслях народного хозяйства, при научных исследованиях, в быту. Электрификация промышленности стала основой механизации и автоматизации технологических процессов.

# 1. Природа электрических явлений

## 1.1. Электрический ток

- *Атом* является наименьшей частицей *элемента*, сохраняющей его характеристики. Атомы различных элементов отличаются друг от друга.
- Каждый атом имеет **ядро**. Ядро расположено в центре атома. Оно содержит положительно заряженные частицы — **протоны** и незаряженные частицы — **нейтроны** (рис.1.1).
- Отрицательно заряженные частицы — **электроны** вращаются вокруг ядер.

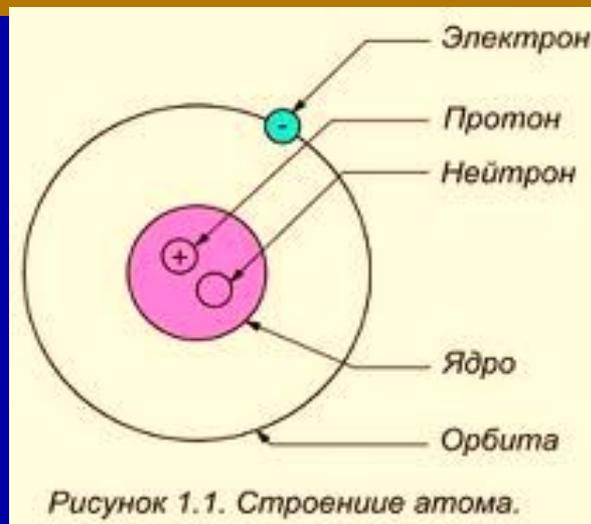
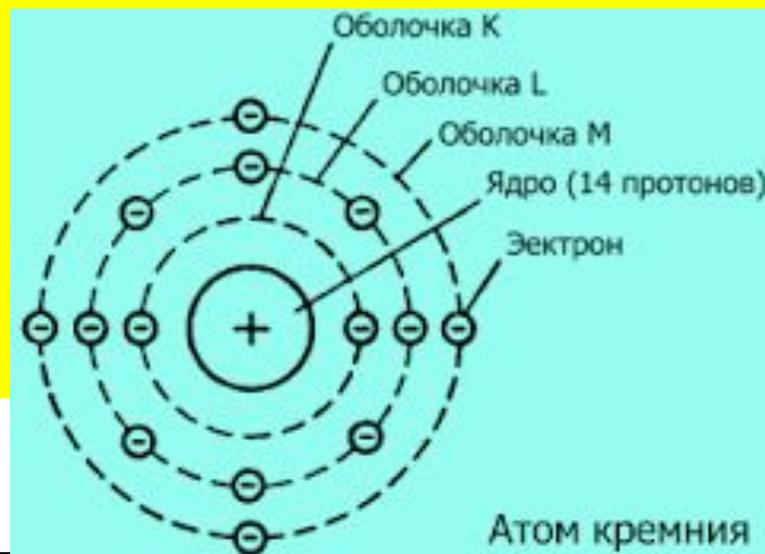


Рисунок 1.1. Строение атома.

- Количество **протонов** в ядре атома называется **атомным номером** элемента. Атомные номера позволяют отличить один элемент от другого .
- Каждый элемент имеет атомный вес. **Атомный вес** —это масса атома, которая определяется общим числом протонов и нейтронов в ядре.
- Электроны практически не дают вклада в общую массу атома, масса электрона составляет только 1/1845 часть массы протона и ею можно пренебречь.
- Электроны вращаются по концентрическим орбитам вокруг ядра. Каждая орбита называется оболочкой. Эти *оболочки* заполняются в следующей последовательности: сначала заполняется оболочка К, затем L, M, N и т.д.



Порядковый номер атома	Название элемента	Символ элемента	Количество электронов на каждой оболочке				
			K	L	M	N	O
13	Алюминий	Al	2	8	3		
14	Кремний	Si	2	8	4		
31	Галлий	Ga	2	8	18	3	
32	Германий	Ge	2	8	18	4	
33	Мышьяк	As	2	8	18	5	
49	Индий	In	2	8	18	18	3
51	Сурьма	Sb	2	8	18	18	5

Внешняя оболочка называется валентной, и количество электронов, содержащееся в ней, называется валентностью.

Чем дальше от ядра валентная оболочка, тем меньшее притяжение со стороны ядра испытывает каждый валентный электрон. Таким образом, потенциальная возможность атома присоединять или терять электроны увеличивается, если валентная оболочка не заполнена и расположена достаточно далеко от ядра

Обозначения оболочек	Общее количество электронов
K	2
L	8
M	18
N	32
O	18
P	12
Q	2

Рис. 1-4. Количество электронов, которое может принять каждая оболочка.

Материал	Проводимость
Серебро	<p>Высокая</p>  <p>Низкая</p>
Медь	
Золото	
Алюминий	
Вольфрам	
Железо	
Нихром	

Рис. 1-5. Проводимость различных металлов, используемых в качестве проводников.

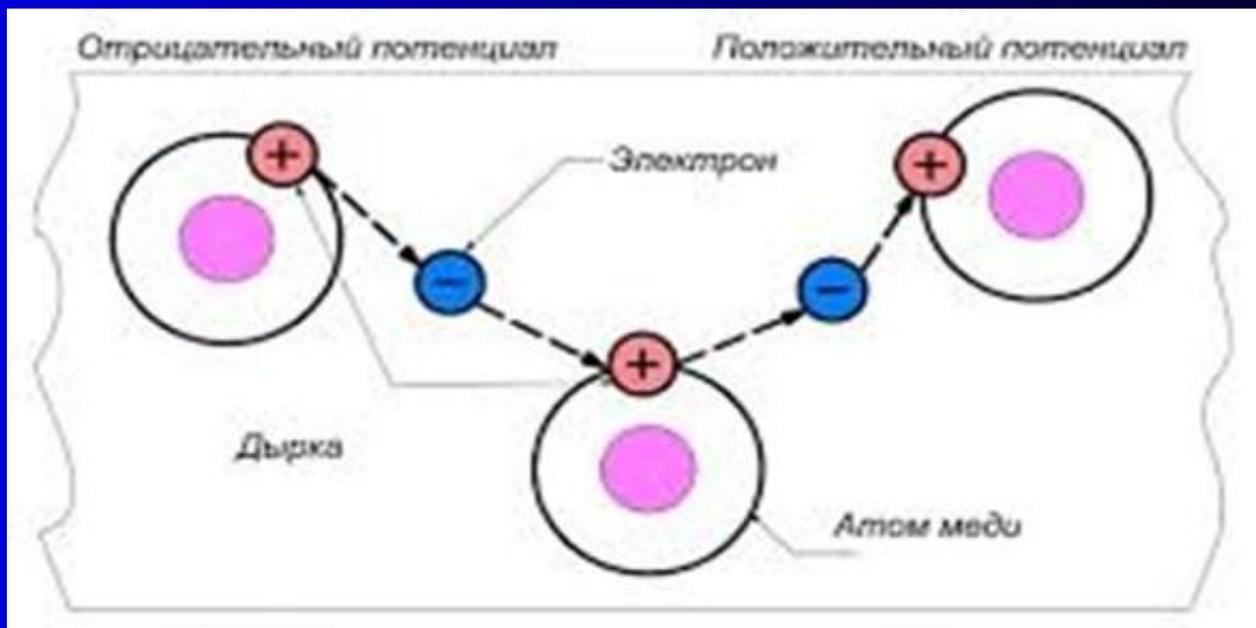
Электроны валентной оболочки могут получать энергию. Если эти электроны получают достаточно энергии от внешних сил, они могут покинуть атом и стать свободными электронами, произвольно перемещающимися от атома к атому. Материалы, содержащие большое количество свободных электронов называются **проводниками**.

**Электрический ток** – направленное движение заряженных частиц, возникающее под действием внешней силы и приводящее к переносу заряда

Отрицательно заряженные электроны являются носителями заряда в электрической цепи.

При перемещении электрона от одного атома к другому создаются положительные заряды, называемые «дырками», которые перемещаются в противоположном направлении.

**Направление электрического тока принято считать обратным направлению движения электронов.**



Материалы, содержащие большое количество свободных электронов называются **проводниками**.

**Изоляторы** препятствуют протеканию электричества

**Полупроводники** не являются ни хорошими проводниками, ни хорошими изоляторами, но их проводимость можно изменять от проводника до изолятора.

- Электрический ток возникает только в замкнутой электрической цепи, содержащей источник тока, создающий напряжение на концах этой цепи.
- Электрический ток, протекающий в одном направлении, получил название **постоянного тока**, а периодически изменяющий направление, - **переменного тока**.

Если имеет место избыток электронов (отрицательный заряд) на одном конце проводника и дефицит электронов (положительный заряд) на другом конце проводника, то по проводнику течет ток. Ток будет течь до тех пор, пока эти условия выполняются. Источник, который создает избыток электронов на одном конце проводника и дефицит электронов на другом конце, характеризуется **потенциалом**. *Потенциал* — это способность источника выполнять электрическую работу.



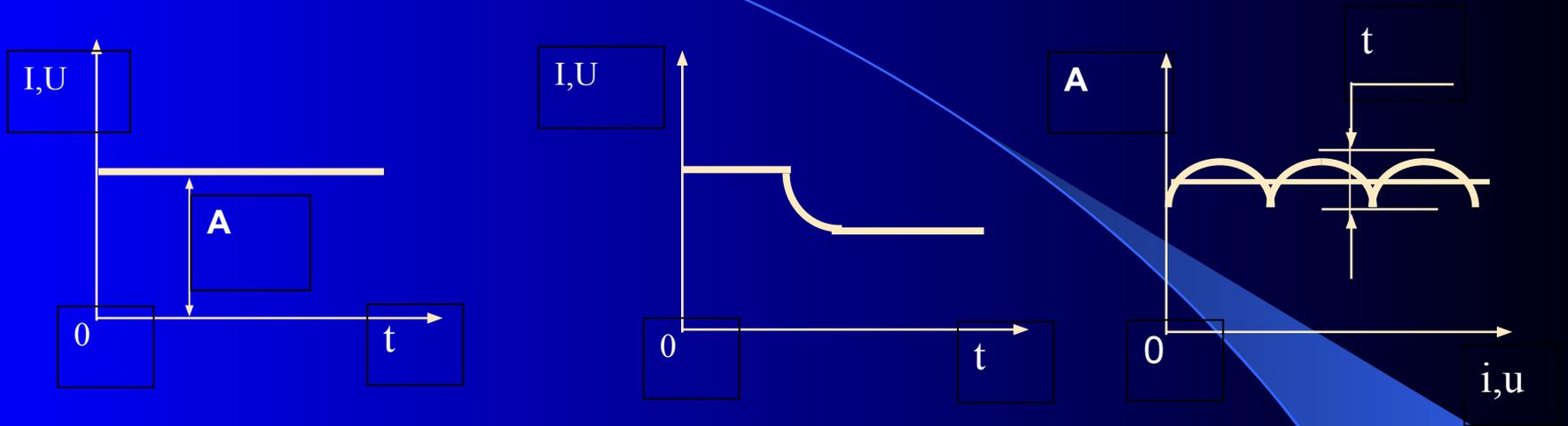
**Напряжение** - это сила, которая перемещает электроны в цепи

Электрический ток представляет собой медленный дрейф электронов из области отрицательного заряда в область положительного заряда. Для измерения силы тока используется ампер (А). Эта единица названа в честь французского физика Андре Мари Ампера (1775–1836). Ампер представляет силу тока в проводнике, когда заряд в один кулон перемещается через заданную точку за одну секунду. Соотношение между ампером и кулоном за секунду выражается формулой:

$$I = \frac{Q}{t},$$

где  $I$  — сила тока в амперах,  $Q$  — величина электрического заряда в кулонах,  $t$  — время в секундах.

# Постоянный ток



Примеры графиков постоянного тока.

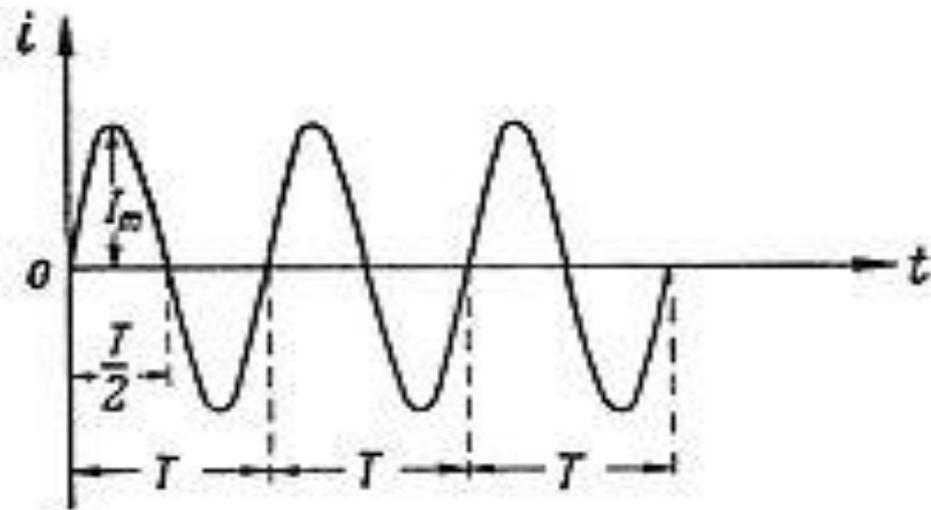
## Основные параметры постоянного тока

1. Амплитуда напряжения (тока) –  $U(I)$ .
2. Амплитуда пульсаций напряжения (тока) –  $\Delta U(\Delta I)$ .

# Переменный ток

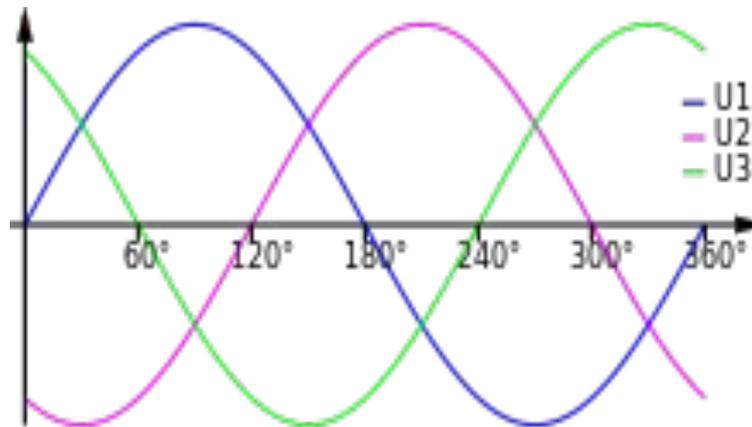
- **Переменным током** называется ток, который во времени изменяется по величине и направлению либо только по величине, либо только по направлению. Переменные токи могут быть периодическими и непериодическими.
- **Периодическим** называется ток, значения которого повторяются через равные промежутки времени. Периодические переменные токи могут быть синусоидальными и несинусоидальными.
- **Синусоидальным током** называется ток, который в течение времени изменяется по синусоидальному закону.

$$i = I_m \sin \omega t$$



Развернутая диаграмма периодического переменного тока

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$



Фаза «А» (или U1), сдвиг по фазе  $0^\circ$

Фаза «В» (или U2), сдвиг по фазе  $120^\circ$

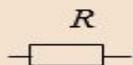
Фаза «С» (или U3), сдвиг по фазе  $240^\circ$

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

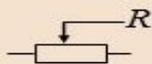
## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



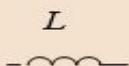
источник постоянной ЭДС (общее обозначение)



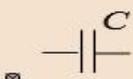
резистивный элемент с постоянным сопротивлением



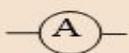
резистивный элемент с переменным сопротивлением



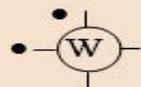
индуктивный элемент



емкостный элемент



амперметр, вольтметр



ваттметр



выключатель



плавкий предохранитель



неразъемное соединение (узел)



зажим, к которому возможно подсоединение

$I$ ,  $E$ ,  $U$  - соответственно ток, ЭДС, напряжение в цепи постоянного тока и действующие ток, напряжение, ЭДС в цепи переменного тока;

$R$  - сопротивление в цепи постоянного тока и активное сопротивление в цепи переменного тока;

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$P$  - мощность в цепи постоянного тока и активная мощность в цепи переменного;

$Q$  и  $S$  - реактивная и полная мощности в цепи переменного тока;

$W$  - произведенная или потребленная энергия;

$B$  и  $H$  – индукция и напряженность магнитного поля;

$\Phi$  - магнитный поток;

$i, e, u$  - мгновенные ток, ЭДС, напряжение;

$L$  и  $C$  - соответственно индуктивность и емкость;

$X_L, X_C$  и  $Z$  - соответственно индуктивное, емкостное и полное сопротивления в цепи переменного тока;

$\dot{E}, \dot{i}, \dot{U}$  - векторы ЭДС, тока и напряжения, представляющие соответствующие мгновенные синусоидальные величины;

$\varphi$  - сдвиг фаз между синусоидальными напряжением и током;

$\cos \varphi$  - коэффициент мощности в цепи переменного тока;

$Y$  и  $Y_N$  – обозначения схем соединения нагрузки соответственно трехпроводной и четырехпроводной звездой;

$\Delta$  - обозначение схемы включения в треугольник;

мк и м – приставки микро- и милли -, означающие соответственно  $10^{-6}$  и  $10^{-3}$  доли основной размерности;

к и М – приставки кило- и мега-, означающие умножение основной размерности соответственно на  $10^3$  и  $10^6$ ;

# Основные понятия электротехники

Количество электрического заряда, положительного или отрицательного, измеряют в кулонах (Кл). Ток – направленное движение зарядов под действием электрического поля. Если, например, через провод за 1 с переносится 1 Кл, то ток равен 1 А (амперу). Здесь и далее сокращения единиц измерения, названных в честь великих ученых, начинаются с заглавной буквы.

Электрическая цепь - это устройства, образующие замкнутые пути для тока. Состояние цепи характеризуют режимом - совокупностью напряжений и токов на участках цепи. Цепь может находиться в установившемся или переходном режиме. В установившемся режиме состояние цепи сохраняется в течение продолжительного времени. Переходный режим - процесс изменения токов и напряжений при переходе от одного установившегося состояния к другому.

Различают также рабочий (нормальный) и аварийный режимы цепи. Аварийному режиму свойственны чрезмерные значения напряжений или токов, вызванных неполадками из-за неправильной эксплуатации устройств, разрыва цепи или короткого замыкания (недопустимого перемыкания участков цепи).

## Основные понятия электротехники

Электротехникой принято называть область практических применений электромагнитных явлений технических устройств сопровождающих производство, преобразование, передачу распределение и потребление электрической энергии.

Практически каждое такое техническое устройство состоит из совокупности разнообразных электрических цепей. Несмотря на относительную сложность таких цепей, они содержат ограниченное число сравнительно простых элементов.

Электрической цепью называется совокупность устройств (элементов), предназначенных для передачи, распределения и взаимного преобразования электрической (электромагнитной) и других видов энергии, если процессы, протекающие в этих устройствах могут быть описаны при помощи понятий электрического тока, напряжения и электродвижущей силы.



**Источником электрической энергии** называют устройство, создающее (генерирующее) электрические токи и напряжения.

**Первичные источники** (преобразующие различные виды энергии в электрическую): аккумуляторы, электромашинные генераторы, термоэлементы, фотодиоды, пьезодатчики и т.д.

**Вторичные источники** (преобразующие электрическую энергию первичных источников в энергию электрических колебаний требуемой формы): генераторы или преобразователи электрических колебаний.

**Приемником электрической энергии** называют устройство, потребляющее (запасающее) или преобразующее электрическую энергию в другие виды энергии (тепловую, световую, механическую и т.д.)

Физическими элементами электрической цепи являются: резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы, трансформаторы, диоды, транзисторы и другие элементы электроники.

Понятия *электрического тока* и *напряжения* являются основными понятиями в теории электрических цепей

# Основные величины, характеризующие магнитное поле

Линии **магнитного поля** замкнутые. В любой точке линии поле характеризуют совпадающими по направлению векторами **магнитной индукции  $B$** , измеряемой в тесла (Тл), и **напряженности магнитного поля  $H$**  (А/м).

Магнитное поле проявляется **индукционным и силовым действиями**, т.е.

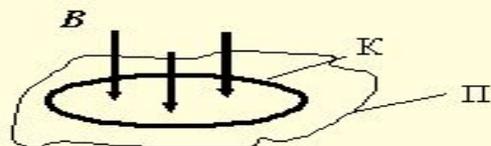


Рис. 2. 1. Поле, пронизывающее контур К на поверхности П

Если линии равномерного поля входят в плоскую поверхность П (рис. 2.1) перпендикулярно (нормально), то **магнитный поток** через контур К, лежащий на этой поверхности,

$$\Phi = SB, \quad (2.1)$$

где  $S$  – площадь ( $\text{м}^2$ ) внутри контура К.

Магнитный поток измеряется в веберах (Вб). Если линии поля входят в поверхность наклонно, то поток уменьшается, а если линии поля параллельны поверхности, то – равен нулю. При смене направления вектора  $B$  меняется знак магнитного потока.

По виду связи между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$  различают немагнитные и ферромагнитные среды и материалы.

Идеальной немагнитной средой является вакуум, для которого

$$B = \mu_0 H, \quad (2.2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м (генри на метр).

К **немагнитным средам и материалам**, для которых также справедлива зависимость (2.2), относятся, например, воздух, бумага, резина, медь, алюминий.

Для таких сред и материалов справедлива линейная связь между индукцией и напряженностью поля, остаточная намагниченность не возникает.

К **ферромагнитным материалам** относятся железо и сплавы, содержащие кобальт, никель, редкоземельные элементы. Такие материалы характеризуются сложной нелинейной зависимостью магнитной индукции от напряженности поля (намагничивающего тока). По виду этой зависимости, которую называют петлей намагничивания (гистерезиса), выделяют магнитотвердые и магнитномягкие материалы.

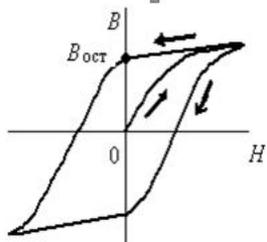


Рис. 2. 2. Петля намагничивания магнитотвердого материала

При увеличении напряженности (намагничивающего тока) постепенно замедляется рост индукции. При уменьшении напряженности  $H$  кривая обратного хода не совпадает с кривой прямого хода (при увеличении  $H$ ).

Когда снова  $H = 0$  (намагничивающий ток отключен), магнитная индукция принимает значение  $B_{ост}$ . Произошло остаточное намагничивание, в материале существует магнитное поле.

Подобные зависимости называют гистерезисными. За один цикл перемагничивания (при обходе всей кривой) выделяется теплота, количество которой пропорционально площади петли гистерезиса. Из магнитотвердых материалов изготавливают постоянные магниты, применяемые в измерительных приборах, магнитных плитах, магнитных опорах, небольших электрических машинах, технологическом оборудовании, даже в быту (магнитные защелки).

Явление остаточной намагниченности означает, что материал как бы "запомнил" воздействие на него магнитного поля. Магнитотвердые материалы используют в устройствах памяти – жестких дисках и гибких дискетах, магнитных лентах, карточках и проч.

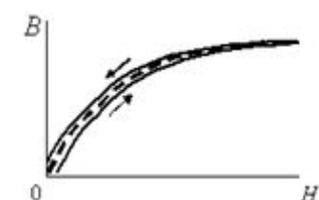


Рис. 2.3. Часть петли намагничивания магнитномягких материалов

У **магнитномягких материалов** петля намагничивания узкая, остаточное намагничивание мало (рис. 2.3). В начале кривой индукция  $B$  почти линейно зависит от напряженности  $H$ . С увеличением напряженности замедляется рост магнитной индукции и наступает насыщение: индукция практически не изменяется. При расчетах используют усредненную кривую намагничивания (пунктир на рис. 2.3). При одинаковой напряженности индукция в магнитномягких материалах значительно выше, чем в немагнитных.

## 2.2. Назначение магнитной цепи

С помощью магнитномягких материалов получают сильные магнитные поля и большие магнитные потоки. Это позволяет существенно усилить все действия магнитного поля. Поэтому такие материалы (обычно электротехнические стали) широко применяют в электрических машинах, трансформаторах, приборах, подъемных электромагнитах, магнитных плитах и проч.

В **магнитной цепи**, содержащей магнитномягкие материалы, создается область пространства, в которой замыкаются линии магнитного поля. Такие цепи служат для сосредоточения магнитного поля, придания линиям нужной конфигурации или получения сильных полей в воздушных промежутках, например, в электрических машинах, приборах, аппаратах, технологическом оборудовании.

В магнитной цепи небольших устройств и приборов магнитное поле создается постоянным магнитом, который входит в состав цепи. При этом не требуется затрат энергии.

В более мощных устройствах используют намагничивающее действие тока: поле возбуждается постоянным током, протекающим в обмотке, которая охватывает участок магнитной цепи. Возникшее магнитное поле не изменяется

во времени. Связь напряженности поля и намагничивающего тока задается законом полного тока.

### 2.3. Применение закона полного тока для анализа магнитной цепи

Вокруг любого провода с током возникает магнитное

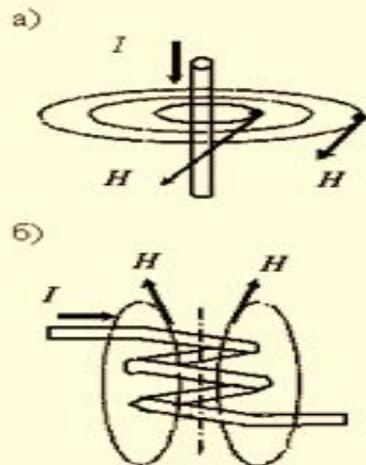


Рис. 2. 4. Магнитное поле: а) прямолинейного провода; б) катушки

поле. Его линии замыкаются вокруг провода. Для примера (рис. 2.4, а), длинный прямолинейный провод с током  $I$  охватывается круговыми магнитными линиями. Векторы  $H$  и  $B$  расположены на касательных к окружностям. С удалением от провода величины  $H$  и  $B$  уменьшаются. При протекании тока  $I$  в катушке (рис. 2.4, б) поля от каждого витка складываются, и возникает более сильное общее поле. Его линии охватывают катушку, внутри нее векторы  $H$  и  $B$  направлены по оси. В любом случае направления тока  $I$  и вектора  $H$  связаны известным **правилом буравчика (правоходового винта)**: если четыре пальца правой руки направить по току, то отставленный большой палец укажет направления

векторов  $B$  и  $H$ . При смене знака тока  $I$  меняются и направления этих векторов.

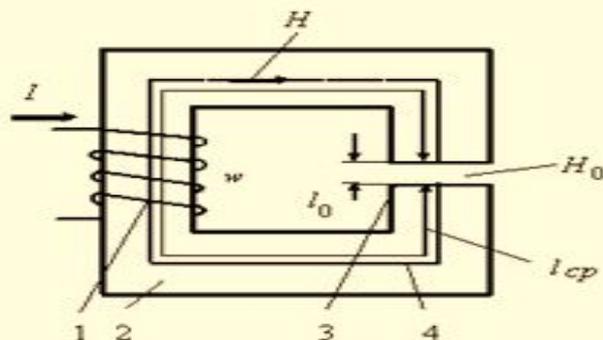


Рис.2. 5. Магнитная цепь с воздушным промежутком

В любом случае связь между током и напряженностью возникшего магнитного поля задается законом полного тока. Применение этого закона рассмотрено для простейшей неразветвленной магнитной цепи (рис.2.5). Током  $I$  в катушке 1, содержащей  $w$  витков, создается магнитное поле, линии которого замыкаются по магнитопроводу 2 и воздушному промежутку 3.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$P$  - мощность в цепи постоянного тока и активная мощность в цепи переменного;

$Q$  и  $S$  - реактивная и полная мощности в цепи переменного тока;

$W$  - произведенная или потребленная энергия;

$B$  и  $H$  – индукция и напряженность магнитного поля;

$\Phi$  - магнитный поток;

$i, e, u$  - мгновенные ток, ЭДС, напряжение;

$L$  и  $C$  - соответственно индуктивность и емкость;

$X_L, X_C$  и  $Z$  - соответственно индуктивное, емкостное и полное сопротивления в цепи переменного тока;

$\dot{E}, \dot{i}, \dot{U}$  - векторы ЭДС, тока и напряжения, представляющие соответствующие мгновенные синусоидальные величины;

$\varphi$  - сдвиг фаз между синусоидальными напряжением и током;

$\cos \varphi$  - коэффициент мощности в цепи переменного тока;

$Y$  и  $Y_N$  – обозначения схем соединения нагрузки соответственно трехпроводной и четырехпроводной звездой;

$\Delta$  - обозначение схемы включения в треугольник;

мк и м – приставки микро- и милли -, означающие соответственно  $10^{-6}$  и  $10^{-3}$  доли основной размерности;

к и М – приставки кило- и мега-, означающие умножение основной размерности соответственно на  $10^3$  и  $10^6$ ;

Закон полного тока формулируют для магнитной цепи, условно разделенной на однородные участки.

На любом из них сохраняется одна и та же напряженность поля. Материал (среда) на каждом участке должен быть однородным, а площадь сечения постоянной. Предполагают также, что линии магнитного поля параллельны друг другу.

В данном случае (см. рис. 2.5) магнитная цепь содержит лишь два однородных участка – магнитопровод и воздушный промежуток. **Закон полного тока** записывают только для средней магнитной линии 4, проходящей по середине всех сечений цепи:

$$wI = Hl_{cp} + H_0 l_0. \quad (2.3)$$

Величину  $wI$  называют намагничивающей силой (полным током).  $H$  и  $H_0$  – соответственно напряженности магнитного поля в магнитопроводе и воздушном промежутке,  $l_{cp}$  – длина средней магнитной линии 4 в магнитопроводе и  $l_0$  – воздушный зазор (см. рис. 2.5). Длины  $l_{cp}$  и  $l_0$  выражают в метрах (м).

Согласно соотношению (2.3) с ростом тока в катушке увеличиваются напряженности поля на обоих участках цепи, растет и магнитная индукция  $B$ . В данном случае на протяжении всей средней магнитной линии магнитный поток  $\Phi = SB$  ( $S$  – площадь сечения магнитопровода) одинаков. Поскольку площадь сечения  $S$  всюду постоянная, то магнитная индукция  $B$  одна и та же для всей цепи.

При этом напряженность магнитного поля в воздушном промежутке  $H_0$  значительно выше, чем в магнитопроводе  $H$ . Поэтому даже при малом зазоре  $l_0$  в правой половине соотношения (2.3)  $H_0 l_0 \gg H l_{cp}$ . Наличие узкого воздушного промежутка существенно снижает в цепи магнитную индукцию и поток.

И наоборот, если, например, поместить в катушку (см. рис. 2.4, б) стержень из магнитно-мягкого материала, то значительно увеличится магнитный поток, создаваемый тем же током.

Поэтому магнитопровод изготавливают из магнитномягкого материала, "подводящего" поток к рабочей зоне машины или прибора, где используется

действие магнитного поля. В частности так создают сильное магнитное поле в воздушном промежутке, например, в электрической машине между статором и ротором.

Анализ магнитной цепи заключается в решении двух задач: **прямой** – расчета тока (намагничивающей силы), требуемого для возбуждения поля с заданным потоком (индукцией); **обратной** – определения потока (индукции) по известному току (намагничивающей силе). При этом должны быть заданы размеры цепи и кривая намагничивания материала магнитопровода (см. рис. 2.3). Из-за нелинейности этой кривой уравнение (2.3) оказывается нелинейным, и решение нельзя получить в общем виде. В обоих случаях применяют графо-аналитический метод с использованием графических зависимостей.

Если в прямой задаче задан требуемый магнитный поток  $\Phi$ , то сначала находят магнитную индукцию цепи  $B = \Phi/S$ . По выражению (2.2) рассчитывают напряженность магнитного поля в воздушном промежутке

$$H_0 = B/\mu_0 = 8 \cdot 10^5 B. \quad (2.4)$$

Напряженность магнитного поля в магнитопроводе  $H$  определяют графически по кривой намагничивания и значению индукции  $B$  (см. рис. 2.3).

Подставляя в выражение (2.3) известные значения  $H_0$ ,  $H$ ,  $l_0$  и  $l_{cp}$ , находят требуемые намагничивающую силу или ток

$$I = (Hl_{cp} + H_0 l_0)/w.$$

Обратную задачу решают графо-аналитическим методом, например подобным тому, который использован при расчете нелинейной цепи постоянного тока (см. п. 1.7). Задают несколько значений магнитного потока в порядке его уменьшения  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \dots$ . На практике обычно ограничиваются всего тремя такими значениями. Решениями прямых задач для каждого из этих значений находят требуемые токи  $I_1, I_2, I_3 \dots$ . Построив по точкам зависимость потока от тока, по заданному потоку  $\Phi$  графически находят искомый ток  $I$ .

Наибольший поток  $\Phi_{max} = \Phi_1$ , с которого начинают построение указанной зависимости, определяют в предположении, что магнитная цепь содержит только воздушный промежуток и согласно соотношению (2.3)

$$\Phi_{max} = SB_{max} = S\mu_0 H_{0max} = S\mu_0 wI/l_0.$$

Более сложные цепи, в том числе разветвленные и с несколькими катушками, рассчитывают по законам Ома и Кирхгофа для магнитных цепей, используя аналогию с цепями постоянного тока.

## 2.4. Закон электромагнитной индукции

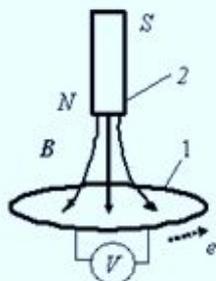


Рис. 2. 6. Контур 1, пронизываемый полем магнита 2

Этот закон описывает возникновение ЭДС в контуре, пронизываемом магнитным полем. Для примера на рис. 2.6 показан контур 1 в виде одного витка провода, к которому подключен вольтметр  $V$ . Через контур проходят линии поля  $B$  от постоянного магнита 2, расположенного вблизи. Вольтметр показывает нуль, если магнит и контур неподвижны относительно друг друга. Но когда они изменяют свое относительное положение, то стрелка вольтметра отклоняется.

Происходит это из-за возникновения в контуре мгновенной ЭДС  $e$ , которая обозначена маленькой буквой, т.к. в общем случае изменяется во времени. Если в контуре назначить определенное условное положительное направление ЭДС, то описанные явления обобщаются **законом электромагнитной индукции**:

$$e = - d\Phi/dt. \quad (2.5)$$

ЭДС  $e$  пропорциональна первой производной по времени  $t$  магнитного потока  $\Phi$ , пронизывающего контур. Абсолютное значение мгновенной ЭДС тем больше, чем выше скорость изменения магнитного потока. Действительное направление ЭДС зависит от того, увеличивается или уменьшается магнитный поток, т.е. от знака первой производной  $d\Phi/dt$ .

Знаком минус в правой части выражения (2.5) учитывают электромагнитную "инерцию" (правило Ленца). Ток в витке, созданный ЭДС, порождает свой

магнитный поток, направленный так, чтобы ослабить любые изменения потока  $\Phi$ , т.е. встречно, когда поток  $\Phi$  растет, и согласно, когда поток  $\Phi$  уменьшается.

Если магнитный поток пронизывает катушку (см. рис. 2.4), содержащую  $w$  витков, то ЭДС всех витков складываются. ЭДС катушки

$$e = - w d\Phi/dt. \quad (2.6)$$

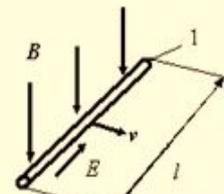


Рис. 2. 7. Наведение ЭДС в проводе, движущемся в магнитном поле

Законом электромагнитной индукции определяется также ЭДС, наводимая, например, в прямолинейном проводе 1,двигающемся перпендикулярно линиям равномерного магнитного поля  $B$ , созданного в воздушном промежутке магнитной цепи (рис.2.7). Если скорость провода  $v$  не изменяется, то возникает постоянная ЭДС

$$E = Blv, \quad (2.7)$$

где  $l$  – длина провода в поле.

Направление ЭДС определяют по **правилу правой руки**: если магнитные линии входят в ладонь, а отставленный большой палец направлен по движению провода, то остальные четыре пальца показывают направление ЭДС.

Рис. 2.7 представляет простейшую модель машинного генератора, т.е. преобразователя механической энергии в электрическую. Чтобы получить ЭДС, создают магнитное поле и относительное движение провода и поля. Если к проводу подключить нагрузку, то образуется электрическая цепь, в которой возникает ток.

## 2.5. Явления самоиндукции и взаимной индукции

**Явление самоиндукции** возникает в катушке (см. рис. 2.4), в которой протекает изменяющийся во времени ток  $i$ , создающий магнитный поток  $\Phi$ . Согласно закону электромагнитной индукции от этого потока в катушке наводится ЭДС  $e_L$ , которую называют ЭДС самоиндукции. Если ее условное положительное направление задать по направлению тока, то

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(Li)}{dt} = -L \frac{di}{dt} . \quad (2.8)$$

Здесь  $L$  – индуктивность катушки в генри (Гн), причем

$$L = w\Phi i. \quad (2.9)$$

Индуктивностью связываются ток  $i$  и возникающий магнитный поток  $\Phi$ . Чем выше отношение произведения потока  $\Phi$  на число витков  $w$  к току  $i$ , тем больше индуктивность  $L$ . Для воздушной катушки, не содержащей ферромагнитных материалов, поток линейно зависит от тока, а индуктивность постоянная. При введении в катушку стержня из магнитномягкого материала значительно увеличиваются поток и индуктивность. При малом токе начальный участок кривой намагничивания практически линейный, поток пропорционален току, а индуктивность катушки с сердечником постоянная.

В любой катушке с ростом тока действительное направление ЭДС самоиндукции встречно току, а при уменьшении тока совпадает с ним. Эта ЭДС всегда направлена так, чтобы задержать любые изменения тока. В магнитном поле катушки запасается энергия  $w_m = Li^2/2$ .

Эти свойства катушки важны при описании ее поведения в цепях переменного тока.

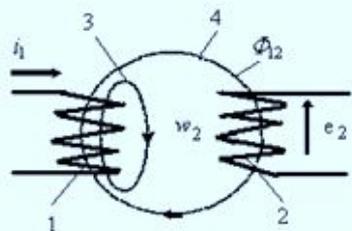


Рис. 2. 8. Явление взаимной индукции

Второе явление – взаимная индукция, возникающая в магнитносвязанных катушках (рис. 2.8). Током  $i_1$  в катушке 1 создается магнитное поле. Вблизи расположена катушка 2. Часть линий магнитного поля 3 замыкается только вокруг катушки 1. Часть линий 4 пронизывает одновременно обе катушки, создавая в катушке 2 поток  $\Phi_2$ . В

катушке 2 наводится ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_2}{dt}, \quad (2.10)$$

где  $w_2$  – число витков катушки 2.

Для увеличения магнитного потока обе катушки устанавливают на магнитопроводе. На явлении взаимной индукции основана работа трансформатора.

## 2.6. Закон электромагнитной силы

Этот закон определяет силу  $F$ , действующую со стороны магнитного поля с индукцией  $B$  на провод с током  $I$  (рис. 2.9). Если линии поля перпендикулярны прямолинейному проводу, то согласно закону электромагнитной силы

$$F = BIl, \quad (2.11)$$

где  $l$  – длина провода в магнитном поле.

Направление электромагнитной силы определяют по правилу левой руки: если магнитные линии входят в ладонь, а четыре пальца направлены по току, то отставленный большой палец указывает направление силы.

Рис. 2.9 представляет модель электрического двигателя, преобразующего электрическую энергию в механическую: в воздушном промежутке магнитной цепи создают магнитное поле и размещают провод (обмотку) с током.

Взаимодействие магнитного поля с током также нашло применение в разнообразных исполнительных механизмах, измерительных приборах магнитоэлектрической системы, магнитогидродинамических насосах для перекачки жидких металлов. В магнитном поле отклоняются движущиеся заряженные частицы, что использовано в электронно-лучевых трубках.

Данным законом объясняется и электродинамическое (силовое) взаимодействие двух проводов с токами. На любой провод действует сила со стороны магнитного поля, созданного током другого провода. Взаимодействие двух катушек с токами положено в основу работы измерительных приборов электродинамической системы.

## 3.1. Особенности и области применения цепей переменного тока

Электрическую цепь, в которой ЭДС, напряжения и токи изменяются во времени по синусоидальному закону, называют цепью переменного тока.

Такие цепи стали основой систем электроснабжения промышленности, сельского хозяйства, быта. Электрическая энергия переменного тока преобразуется двигателями в механическую работу, нагревательными устройствами – в теплоту. Эта энергия преобразуется также в энергию постоянного тока, необходимую для работы, например, технологического оборудования, двигателей постоянного тока, электронной аппаратуры.

Для электрификации были применены цепи переменного тока, поскольку обеспечивали высокую эффективность систем электроснабжения – производство, передачу и потребление электрической энергии.

Переменным током создается переменное магнитное поле. Это дало возможность разработать устройства, принцип работы которых основан на индукционном действии такого поля, т.е. на способности наводить переменную ЭДС.

В частности периодическая смена направления тока позволяет с помощью трансформаторов изменять переменное напряжение. На электростанциях это напряжение, вырабатываемое генераторами, повышается. При передаче электроэнергии на большие расстояния с увеличением напряжения существенно сокращаются расход проводниковых материалов и потери энергии. В местах потребления энергии напряжение понижается до номинальных значений, при которых работают приемники.

Благодаря явлениям, возникающим только при переменном токе, созданы двигатели и генераторы, принцип действия которых позволяет упростить конструкцию машин и повысить их надежность.

Кроме того, в цепях переменного тока легче гасится дуга между размыкаемыми контактами, поскольку ток периодически становится равным нулю. Переменный ток более безопасен при поражениях, чем постоянный.

## 3.2. Получение синусоидальной ЭДС

В однофазной цепи все токи и напряжения создаются единственным источником синусоидальной ЭДС. Мгновенные ЭДС, токи и напряжения зависят от времени и обозначаются строчными буквами, соответственно  $e$ ,  $i$  и  $u$ .

Положительное направление ЭДС  $e$  задают ее стрелкой на схеме (рис.3.1), и, например, если  $e > 0$ , то действительное направление мгновенной ЭДС совпадает с положительным. За одну секунду синусоидальная ЭДС  $f$  раз повторяет свои значения. Величину  $f$  называют частотой и измеряют в герцах (Гц). Обычно однофазная цепь – часть трехфазной промышленной сети. В России для таких сетей по стандарту частота  $f = 50$  Гц.

Независимые однофазные цепи применяют, например, при работе с преобразователями частоты, в подвижных объектах, в электронных устройствах. В таких случаях частота может изменяться в очень широких пределах.

Синусоидальную ЭДС можно получить в витке провода (рис. 3.2), который вращается с угловой частотой  $\omega$  в однородном постоянном магнитном поле с индукцией  $B$ . При этом периодически изменяется магнитный поток через контур витка. Согласно закону электромагнитной индукции (2.5) на зажимах витка  $a$  и  $b$  возникает синусоидальная ЭДС  $e$ .

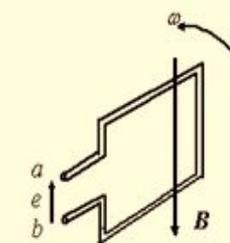


Рис. 3. 2. Наведение синусоидальной ЭДС  $e$  в витке провода

Если нагрузка к зажимам  $a$  и  $b$  (см. рис. 3.1) подключается соединительными проводами с небольшим сопротивлением, то согласно второму закону Кирхгофа для мгновенных величин  $e = u$ , где  $u$  – напряжение на нагрузке. В такой цепи положительные направления ЭДС, тока и напряжения совпадают.

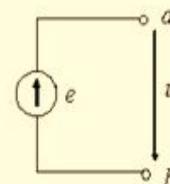


Рис. 3. 1. Источник однофазной переменной ЭДС

### 3.3. Основные параметры синусоидальной величины

Эти параметры рассмотрены на примере зависимости мгновенного тока  $i$  от времени  $t$  (рис. 3.3), представленной в тригонометрическом виде:

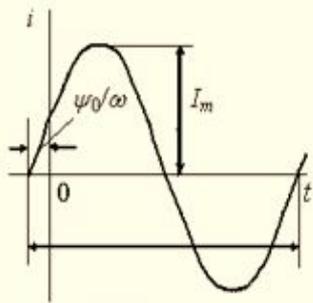


Рис. 3.3. Зависимость синусоидального тока  $i$  от времени  $t$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_0) = I_m \sin(2\pi f t + \psi_0).$$

Основными параметрами служат:

$I_m$  — **амплитуда**, т.е. наибольшее абсолютное значение тока;

$\omega$  — **угловая частота**, причем

$$\omega = 2\pi f, \quad (3.1)$$

$\omega t + \psi_0$  — **фаза**;

$\psi_0$  — **начальная фаза**, т.е. при  $t = 0$ ;

$f$  — **частота**.

На графике синусоидальной величины (см. рис. 3.3) по оси абсцисс обычно откладывают время  $t$  (иногда  $\omega t$ ). Фазу ( $\omega t + \psi_0$ ) и начальную фазу  $\psi_0$  выражают в градусах (град) или радианах (рад), угловую частоту  $\omega$  — в радиан в секунду (рад/с) или в (1/с). Для промышленных сетей России, в которых частота  $f = 50$  Гц, согласно выражению (3.1) угловая частота  $\omega = 2\pi \cdot 50 = 314$  1/с. Период  $T = 1/f$  — наименьшее время повторения значений тока, для промышленных сетей  $T = 0,02$  с.

Подобными тригонометрическими выражениями представляют также синусоидальные ЭДС  $e$  и напряжения  $u$ , амплитуды которых обозначают  $E_m$  и  $U_m$ .

Состояние цепи в принципе можно описать мгновенными ЭДС, напряжениями и токами, ее характеризующими. Но их вычисление очень громоздкое, и поэтому расчеты цепей ведут по так называемым **действующим значениям**.

Для тока понятие действующего значения вводится так. Пусть имеются два резистивных элемента с одинаковыми сопротивлениями  $R$ . В одном элементе постоянный ток  $I$ , а в другом переменный  $i = I_m \sin \omega t$ . **Действующий пе-**

**ременный ток** численно равен такому постоянному току, при котором за одно и то же время на обоих элементах выделяется одинаковое количество теплоты.

Например, за период  $T$  при постоянном токе соответственно выражению (1.5) количество теплоты составит  $R I^2 T$ , а при переменном —  $\int_0^T R i^2 dt$ . Если приравнять обе величины и провести интегрирование, то действующий переменный ток

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m. \quad (3.2)$$

Таким образом, **действующее значение тока  $I$**  независимо от начальной фазы численно равно постоянному току, эквивалентному переменному по тепловому действию.

**Действующие ЭДС и напряжение** так же связаны с амплитудами  $E_m$  и  $U_m$ :

$$E = E_m / \sqrt{2} = 0,707 E_m; \quad (3.3)$$

$$U = U_m / \sqrt{2} = 0,707 U_m. \quad (3.4)$$

Электрическое состояние цепей переменного тока характеризуют действующими значениями ЭДС, тока и напряжения. Измерительные приборы, применяемые в цепях переменного тока (вольтметры и амперметры), также показывают действующие величины.

Для промышленных электрических сетей с напряжениями до 1 кВ и присоединяемых к ним приемников стандартом установлены **номинальные** действующие значения напряжений 220, 380 и 660 В.

Например, если действующее значение напряжения в однофазной сети, измеренное вольтметром, равно 220 В, то амплитуда напряжения  $U_m = \sqrt{2} \cdot 220 \approx 310$  В. Действующему значению тока  $I = 1$  А, измеренному амперметром, соответствует амплитуда тока  $I_m = \sqrt{2} \cdot 1 = 1,41$  А.

### 3.4. Представление синусоидальных величин векторами

Законы Ома и Кирхгофа в алгебраической форме справедливы для мгновенных ЭДС, напряжений и токов. Действия с мгновенными величинами трудоемки и неудобны для практических расчетов. Анализ цепи переменного тока

построен на представлении векторами упомянутых мгновенных величин.

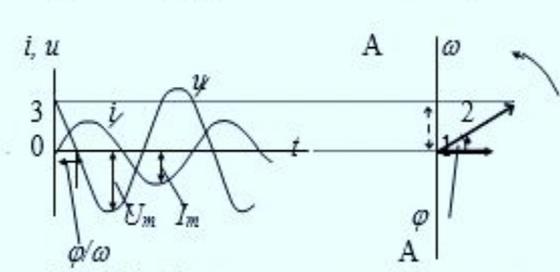


Рис. 3.4. Представление синусоидальных тока  $i$  и напряжения  $u$  вращающимися векторами 1 и 2

Для примера на рис. 3.4 показаны мгновенные ток  $i$  и напряжение  $u$  одной и той же цепи, изменяющиеся с одинаковой частотой  $f$ . Току соответствует вектор 1 длиной, равной амплитуде  $I_m$ , а напряжению – вектор 2 длиной  $U_m$ . С угловой частотой  $\omega = 2\pi f$  векторы вращаются против часовой стрелки.

При вращении вектор напряжения 2 опережает вектор тока 1 на угол  $\varphi$ , называемый **сдвигом фаз** и равный разности начальных фаз напряжения и тока. Векторы показаны в положении, соответствующем времени  $t = 0$ . Каждая мгновенная величина в любой момент равна проекции своего вектора на вертикальную ось А-А. Например, на рис. 3.4 проекция 3 вектора напряжения 2, данная для момента  $t = 0$ , равна мгновенному напряжению  $u$  в этот момент.

Синусоидальным ЭДС, токам и напряжениям одинаковой частоты соответствуют векторы, вращающиеся с одинаковой угловой скоростью. Их длины и относительные положения не изменяются во времени. Чтобы изучить состояние цепи, можно остановить вращение этих векторов в любой момент, например, при  $t = 0$ . Для упрощения расчетов цепей **длины всех неподвижных векторов задают по действующим значениям**. Для всех векторов тока указывают одинаковый масштабный коэффициент  $m_I$ . Его размерность, например, А/см означает, сколько ампер соответствует одному сантиметру длины вектора. Для всех векторов ЭДС и напряжения выбирают собственный, но одинаковый масштабный коэффициент  $m_U$  с размерностью В/см. Численные значения масштабных коэффициентов должны соответствовать стандарту.

Векторы ЭДС, напряжения и тока обозначают  $E, U, I$ . Эти векторы двумерные, существуют лишь в плоскости рисунка. Их помечают сверху точками в отличие от пространственных векторов, например, магнитной индукции  $B$ .

овокупность неподвижных векторов, представляющих синусоидальные величины одной цепи, называют **векторной диаграммой**. Она наглядно показывает действующие значения и фазовые соотношения между мгновенными ЭДС, напряжениями и токами.

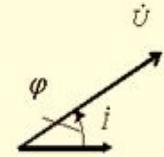


Рис. 3.5. Пример векторной диаграммы

На рис.3.5 - векторная диаграмма, где в некотором масштабе изображены векторы  $I$  и  $U$ , соответствующие положениям вращающихся векторов, которые остановлены в момент  $t = 0$  (см. рис. 3.4). В таком случае считается, что угол  $\varphi > 0$  и вектор напряжения опережает вектор тока на угол  $\varphi$  или что вектор тока отстает на тот же угол  $\varphi$  от вектора напряжения.

В уравнениях по законам Кирхгофа алгебраическое сложение мгновенных величин представляется сложением соответствующих векторов.

### 3.5. Идеальные линейные элементы цепей переменного тока

Для отображения на схемах устройств переменного тока недостаточно лишь резистивных элементов. Необходимы идеальные элементы трех видов – резистивный  $R$ , индуктивный  $L$  и емкостный  $C$ , каждый из которых отображает лишь по одному определенному свойству устройств.

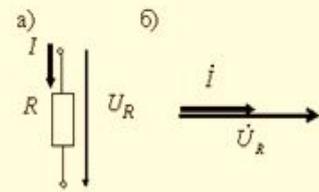


Рис. 3.6. Резистивный элемент: а) участок цепи; б) векторная диаграмма

**Резистивным элементом** представляют на схеме часть цепи, в которой протекает лишь преобразование электрической энергии в тепловую. Единственный параметр резистора – активное сопротивление  $R$  на переменном токе, при частоте 50 Гц почти такое же, как при

постоянном (рис. 3.6, а). Положительные направления напряжения и тока условно указывают стрелками, помечаемыми действующими величинами  $U_R$  и  $I$  (или мгновенными  $u_R$  и  $i$ ).

Мгновенные напряжение и ток  $i$  связаны прямо пропорционально согласно закону Ома:  $u_R = Ri$ . Если ток синусоидальный с амплитудой  $I_m$  (см. рис. 3.3), то мгновенное напряжение также синусоидальное, а его амплитуда  $U_{Rm} = RI_m$ .

Если обе части последнего соотношения поделить на  $\sqrt{2}$ , то с учетом выражения (3.2) для резистора можно получить **закон Ома** для действующих значений (показаний приборов):

$$U_R = RI. \quad (3.5)$$

Между синусоидальными током и напряжением отсутствует сдвиг фаз: угол  $\varphi = 0$ , а направления векторов  $I$  и  $U$  совпадают (рис. 3.6, б).

Поскольку действующий ток численно равен постоянному току, эквивалентному переменному по тепловому действию, то мощность потребления энергии резистором

$$P = RI^2 = U_R I = U_R^2 / R. \quad (3.6)$$

Эта мощность, как и в цепях постоянного тока, выражается в ваттах (Вт), но называется активной мощностью. Ее измеряют ваттметром.

**Пример.** Если на резистор с сопротивлением  $R = 100$  Ом подано действующее напряжение 220 В, то согласно закону Ома (3.5) амперметр покажет действующий ток  $I = 220/100 = 2,2$  А, а в соответствии с выражением (3.6), активная мощность, измеренная ваттметром,

составит  $P = 100 \cdot 2,2^2 = 484$  Вт.

**Индуктивным элементом** (идеальной катушкой индуктивности) на схемах (рис. 3.7) отображают способность устройства создавать магнитное поле. Поле обладает энергией  $W_M = L i^2 / 2$ , зависящей от индуктивности  $L$  и мгновенного тока  $i$ . Для этого элемента связь между мгновенными

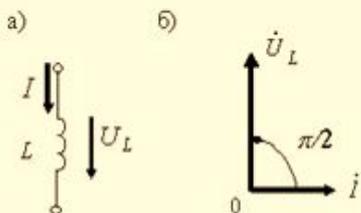


Рис. 3.7. Индуктивный элемент: а) участок цепи; б) векторная диаграмма

напряжением и током задается дифференциальным уравнением, вытекающим

из выражения (2.8):  $u_L = -e_L = L di/dt$ . Считая ток синусоидальным  $i = I_m \sin \omega t$ , дифференцированием можно найти, что  $u_L = \omega L I_m \cos \omega t$ . Сомножитель перед косинусом – амплитуда напряжения  $U_{Lm} = \omega L I_m$ . После деления обеих частей этого соотношения на  $\sqrt{2}$  получают **закон Ома** для действующих величин на индуктивном элементе

$$U_L = X_L I. \quad (3.7)$$

Коэффициент пропорциональности

$$X_L = \omega L \quad (3.8)$$

выражается в омах (Ом) и называется индуктивным сопротивлением.

**Пример.** Если индуктивность  $L = 22,3$  мГн, а частота  $f = 50$  Гц, то угловая частота  $\omega = 314$  1/с, а согласно соотношению (3.8) индуктивное сопротивление  $X_L = 314 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} = 7$  Ом (сомножителем  $10^{-3}$  миллигенри переводятся в основную единицу – генри).

Индуктивное сопротивление снижается с уменьшением частоты. При постоянном токе, т.е. при  $\omega = 0$ , оно становится равным нулю, что и учитывают при расчете цепей постоянного тока. Мгновенный ток, заданный синусоидой и пропорциональный первой производной от напряжения, отстает на угол  $\pi/2 = 90^\circ$  от напряжения, представляемого косинусоидой. Вектор  $I$  отстает на угол  $90^\circ$  от вектора напряжения  $U_L$  (рис. 3.7, б), угол  $\varphi = +90^\circ$ .

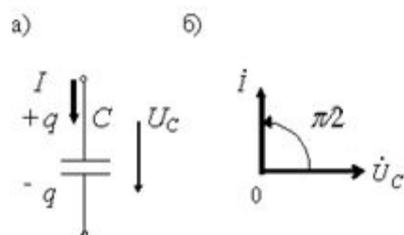
С ростом мгновенного тока увеличивается энергия магнитного поля, и индуктивный элемент энергию потребляет. С уменьшением тока до нуля энергия поля убывает, и элемент возвращает столько же энергии, сколько и было получено от цепи. Индуктивный элемент и остальная цепь периодически обмениваются энергией. Интенсивность такого обмена – индуктивная мощность

$$Q_L = X_L I^2 = U_L I = U_L^2 / X_L. \quad (3.9)$$

Единица измерения этой мощности – В·Ар (вольт-ампер реактивный) и более крупные единицы кВ·Ар, МВ·Ар.

Пусть на индуктивном элементе с сопротивлением  $X_L = 7$  Ом действующее напряжение 220 В. Тогда согласно закону Ома (3.7) действующий ток, измеряемый амперметром,  $I = 31,4$  А, а из расчета по выражению (3.9) следует, что индуктивная мощность  $Q_L = 69143$  В·Ар = 69,143 кВ·Ар.

**Емкостным элементом** на схемах представляют устройство (идеальный конденсатор), в котором создается электрическое поле, как и магнитное, обладающее энергией. Электрическое поле возникает в диэлектрике между обкладками конденсатора с зарядами  $+q$  и  $-q$  (рис. 3.8).



Количество заряда пропорционально напряжению  $u_C$  на обкладках:

$$q = C u_C,$$

где  $C$  – емкость в фарадах (Ф).

Энергия, накопленная в поле,  $W_C = C u_C^2 / 2$ . Заряды через диэлектрик не переносятся, и ток для конденсатора  $i$  – это скорость подвода зарядов к обкладкам:

$$i = dq/dt = C du_C/dt.$$

Если напряжение представляется синусоидой  $u_C = U_{cm} \sin \omega t$ , то ток после дифференцирования – также гармонической функцией, косинусоидой:

$$i = \omega C U_{cm} \cos \omega t,$$

где  $I_m = \omega C U_{cm}$  – амплитуда тока.

Мгновенное напряжение отстает от мгновенного тока на угол  $\pi/2 = 90^\circ$ . Вектор напряжения  $U_C$  на угол  $90^\circ$  отстает от вектора тока  $I$ , а вектор тока опережает вектор напряжения  $U_C$  на тот же угол (рис. 3.8, б), угол  $\varphi = -90^\circ$ .

Если обе части выражения для амплитуды тока разделить на  $\sqrt{2}$ , то можно получить **закон Ома** для действующих значений емкостного элемента:

$$U_C = X_C I. \quad (3.10)$$

Величину

$$X_C = 1/\omega C, \quad (3.11)$$

измеряемую в омах (Ом), называют емкостным сопротивлением.

Например, при угловой частоте  $\omega = 314$  1/с и емкости  $C = 1060$  мкФ согласно выражению (3.11) емкостное сопротивление  $X_C = 1/314 \cdot 1060 \cdot 10^{-6} = 3$  Ом.

С уменьшением частоты емкостное сопротивление увеличивается. В цепях постоянного тока его считают бесконечно большим, а емкостный элемент – разрывом в соответствующей ветви: постоянный ток конденсатора равен нулю.

Когда мгновенное напряжение растет, то элемент потребляет энергию, запасаемую в электрическом поле. За время снижения этого напряжения до нуля вся взятая энергия отдается в цепь. Интенсивность обмена энергией элемента с цепью – емкостная мощность

$$Q_C = X_C I^2 = U_C I = U_C^2 / X_C, \quad (3.12)$$

измеряемая, как и индуктивная, в В·Ар, кВ·Ар, МВ·Ар и т. д.

Для примера, если на емкостном элементе с сопротивлением  $X_C = 3$  Ом напряжение 220 В, то ток  $I = 73,3$  А и емкостная мощность  $Q_C = 14,8$  кВ·Ар.

Все рассмотренные идеальные элементы цепи линейные, их параметры – активное сопротивление, индуктивность и емкость, постоянные. Если напряжение (ток) на любом таком элементе синусоидальное, то и ток (напряжение) элемента также синусоидальный той же частоты.

### 3.6. Анализ состояния линейной неразветвленной цепи

Три идеальными элементами на схемах представляют разнообразные устройства. Например, обмотку электромагнита считают катушкой – последовательно соединенными индуктивным и резистивным элементами, причем последним

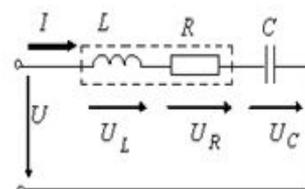


Рис. 3.9. Схема неразветвленной цепи

учитывают активное сопротивление обмотки.

Если к катушке последовательно подключить конденсатор, то образуется **неразветвленная R-L-C-цепь**, схема которой содержит элементы всех трех видов (рис. 3.9). Эле-

менты катушки обведены пунктирной линией. Расчет линейной цепи обычно проводят при заданных индуктивности  $L$ , активном сопротивлении  $R$ , емкости  $C$ , частоте  $f$  и напряжении  $U$ . По второму закону Кирхгофа для мгновенных напряжений на элементах:

$$u = u_L + u_R + u_C.$$

При синусоидальных величинах такому алгебраическому выражению соответствует векторное

$$U = U_L + U_R + U_C. \quad (3.13)$$

представляемое на векторной диаграмме.

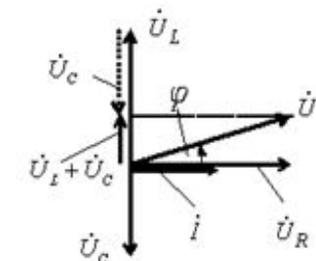


Рис. 3.10. Пример векторной диаграммы для неразветвленной цепи

условно длина вектора  $U_L$  взята большей, чем  $U_C$ . Вектор  $U$  на рис. 3.10 получен прямым сложением вектора  $U_R$  и вектора  $U_L + U_C$ , причем длина последнего равна разности напряжений  $U_L - U_C$ . Действующее напряжение  $U$  по теореме Пифагора определяется как длина гипотенузы прямоугольного треугольника

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Напряжения под корнем можно определить через действующий ток согласно выражениям (3.5), (3.7) и (3.10). Если из-под корня вынести квадрат тока, то получают **закон Ома** для действующих значений в неразветвленной цепи:

$$U = ZI, \quad (3.14)$$

где  $Z$  - полное сопротивление, измеряемое в омах, причем для  $R$ - $L$ - $C$ -цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (3.15)$$

Сдвиг фаз  $\varphi$  между напряжением и током (см. рис. 3.10) положительный, а напряжение опережает ток на угол  $\varphi$ , если  $U_L > U_C$  (см. рис. 3.10). Это объясняется тем, что индуктивное сопротивление больше емкостного ( $X_L > X_C$ ).

Угол  $\varphi$  отрицателен и напряжение отстает от тока, если  $U_L < U_C$ , что объясняется преобладанием в цепи емкостного сопротивления ( $X_L < X_C$ ).

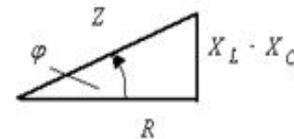


Рис. 3.11. Треугольник сопротивлений

Если все стороны прямоугольного треугольника напряжений на векторной диаграмме (см. рис. 3.10) разделить на ток  $I$ , то образуется подобный ему треугольник сопротивлений (рис. 3.11). Один катет соответствует активному сопротивлению  $R$ , а другой - разности ( $X_L - X_C$ ), называемой реактивным сопротивлением.

Гипотенуза соответствует полному сопротивлению  $Z$ , которое определяется выражением (3.15) и может быть рассчитано по катетам. Из треугольника сопротивлений следует, что

$$\cos \varphi = R/Z. \quad (3.16)$$

Если  $X_L > X_C$ , то нагрузка носит активно-индуктивный характер, ток отстает от напряжения на угол  $\varphi$ , причем  $0 < \varphi < 90^\circ$ ;  $0 < \cos \varphi < 1$ . При  $X_L < X_C$  цепь представляет нагрузку активно-емкостного характера, ток опережает напряжение на угол  $\varphi$ . При этом  $0 > \varphi > -90^\circ$ ;  $0 < \cos \varphi < 1$ .

**Пример.** Для неразветвленной цепи (см. рис. 3.9)  $R = 3$  Ом,  $X_L = 7$  Ом,  $X_C = 3$  Ом, а действующее напряжение сети  $U = 100$  В. Согласно выражению

(3.15) полное сопротивление цепи  $Z = \sqrt{3^2 + (7-3)^2} = 5$  Ом, а по закону Ома

(3.14) ток  $I = 100/5 = 20$  А. Из соотношения (3.16) следует, что  $\cos \varphi = 3/5 = 0,6$ .

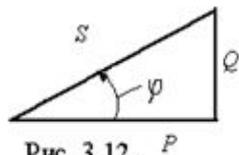
Последнему значению соответствует угол  $\varphi \approx 53^\circ$ . Поскольку  $X_L > X_C$ , то для сети данная цепь представляет нагрузку активно-индуктивного характера. Ток отстает от напряжения на угол  $\varphi \approx 53^\circ$ .

Когда в  $R-L-C$ -цепи  $X_L = X_C$ , то возникает особое состояние, называемое **резонансом напряжений**. Согласно выражениям (3.7) и (3.10) действующие напряжения на индуктивном и емкостном элементах одинаковые,  $U_L = U_C$ . Алгебраическая сумма мгновенных напряжений  $u_L$  и  $u_C$  и векторная сумма  $U_L + U_C$  равны нулю. Действующее напряжение на резисторе  $U_R$  равно напряжению сети  $U$ , полное сопротивление равно активному,  $Z_{рез} = R$ , а ток  $I$  наибольший. Такая цепь представляет активную нагрузку, при которой  $\varphi_{рез} = 0$ ,  $\cos \varphi_{рез} = 1$ .

Если  $X_L = X_C \gg R$ , то напряжения на индуктивном и емкостном элементах при резонансе могут быть гораздо больше входного напряжения. Это представляет опасность при эксплуатации электроустановок переменного тока.

### 3.7. Активная, реактивная и полная мощности

Если стороны треугольника сопротивлений (см. рис. 3.11) умножить на квадрат действующего тока  $I^2$ , то образуется подобный треугольник мощностей (рис. 3.12). Одному катету согласно выражению (3.6) соответствует активная



мощность  $P = RI^2$ , т.е. мощность потребления энергии в ваттах (Вт). Другому катету соответствует величина  $(X_L - X_C)I^2$ , которую называют **ре-**

**активной мощностью** цепи  $Q$  и с учетом выражений (3.9) и (3.12) рассчитывают по формуле

$$Q = Q_L - Q_C. \quad (3.17)$$

Единицы измерения этой величины – В·Ар, кВ·Ар, МВ·Ар и проч. Реактивная мощность показывает **интенсивность обмена энергией** между всей цепью и источником энергии. В активно-индуктивных цепях, т.е. при  $X_L > X_C$ ,  $Q_L > Q_C$ , реактивная мощность является индуктивной. В цепях активно-емкостного характера (при  $Q_L < Q_C$ ) реактивная мощность – емкостная.

При резонансе напряжений, т.е. при  $Q_L = Q_C$  для источника энергии цепь – активный приемник энергии, и реактивная мощность цепи  $Q = 0$ . Обмен энергией происходит между индуктивным и емкостным элементами.

Гипотенуза треугольника мощностей (см. рис. 3.12) соответствует **полной мощности**  $S$ , которая согласно теореме Пифагора

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3.18)$$

Полная мощность представляет **интенсивность общего энергетического процесса в цепи – и потребления, и обмена энергией**, и согласно выражению (3.18) определяется как активной мощностью  $P$ , так и реактивной  $Q$ . Полную мощность измеряют в В·А (вольт-ампер), кВ·А, МВ·А и др.

Треугольник мощностей (см. рис. 3.12) получен умножением на  $I^2$  сторон треугольника сопротивлений (см. рис. 3.11), поэтому полная мощность  $S = ZI^2$  и с учетом закона Ома (3.14)

$$S = UI. \quad (3.19)$$

Из треугольника мощностей следует, что активная мощность

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi. \quad (3.20)$$

Величину  $\cos \varphi$  называют **коэффициентом мощности**, определяющим ту часть полной мощности цепи, которая соответствует активной мощности. Активная мощность цепи зависит не только от напряжения и тока, но и от сдвига фаз  $\varphi$  между напряжением и током.

Из треугольника мощностей можно найти реактивную мощность цепи

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (3.21)$$

**Пример.** Для схемы на рис. 3.9, представляющей активно-индуктивную нагрузку, известно, что  $U = 100$  В,  $I = 20$  А,  $\cos \varphi = 0,6$ . По данному коэффициенту мощности  $\cos \varphi$  можно найти  $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 0,8$ . Активную, реактивную и полную мощности рассчитывают соответственно по выражениям (3.19), (3.20) и (3.21):  $P = 100 \cdot 20 \cdot 0,6 = 1200$  Вт = 1,2 кВт;  $Q = 100 \cdot 20 \cdot 0,8 = 1600$  В·Ар = 1,6 кВ·Ар;  $S = 100 \cdot 20 = 2000$  В·А = 2,0 кВ·А. Полную мощность можно определить и по выражению (3.18).

Если для цепи  $\cos \varphi = 0$ , то, несмотря на наличие тока, активная мощность равна нулю и энергия не потребляется, как, например, в цепях, содержащих лишь реактивные элементы (см. рис. 3.7 и 3.8). При этом  $\sin \varphi = 1$ , и соответственно преобладанию того или иного сопротивления реактивная мощность может быть либо индуктивной, либо емкостной.

Если последовательно соединены несколько резистивных, индуктивных или емкостных элементов, то сопротивления каждого вида суммируют по отдельности, а затем находят полное сопротивление цепи по выражению (3.15).

### 3.8. Анализ цепи с параллельными ветвями

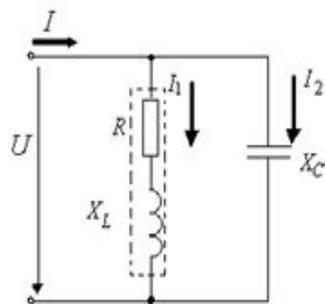


Рис. 3.13. Схема цепи с двумя параллельными ветвями

Пусть в одну из параллельных ветвей (рис.3.13) включена катушка с активным и индуктивным сопротивлениями  $R$  и  $X_L$ , а в другую - конденсатор с емкостным сопротивлением  $X_C$ . На обе ветви подано одинаковое напряжение  $U$ . Токи в ветвях согласно закону Ома (3.14):

$$I_1 = U/Z_1, I_2 = U/Z_2, \quad (3.22)$$

где соответственно выражению (3.15) полные сопротивления ветвей

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + X_L^2}; Z_2 = X_C. \quad (3.23)$$

Коэффициенты мощности обеих ветвей

$$\cos \varphi_1 = R/Z_1; \cos \varphi_2 = 0. \quad (3.24)$$

Пример. Для схемы (см. рис. 3.13)  $R = 6$  Ом,  $X_L = 8$  Ом,  $X_C = 22$  Ом,  $U = 220$  В. Соответственно выражениям (3.23) полные сопротивления ветвей  $Z_1 = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10$  Ом,  $Z_2 = X_C = 22$  Ом.

Согласно закону Ома (3.22) токи  $I_1 = 220/10 = 22$  А,  $I_2 = 220/22 = 10$  А, а по выражениям (3.24) коэффициенты мощности ветвей  $\cos \varphi_1 = 0,6$  и  $\cos \varphi_2 = 0$ .

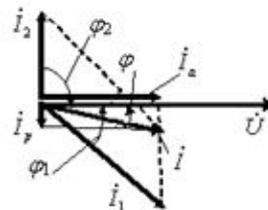


Рис. 3.14. Векторная диаграмма для схемы на рис. 3.13

При этом углы сдвига фаз для обеих ветвей  $\varphi_1 = 53^\circ$  и  $\varphi_2 = -90^\circ$ .

По этим данным можно построить векторную диаграмму, начиная с вектора напряжения  $U$ , общего для обеих ветвей (рис. 3.14). Этот вектор в масштабе откладывают по горизонтали. Вектор тока  $I_1$  длиной  $I_1$  отстает от вектора  $U$  на угол  $\varphi_1$ ,

т.к. нагрузка первой ветви активно-индуктивная.

Во второй ветви, где нагрузка емкостная, вектор тока  $I_2$  длиной  $I_2$  опережает вектор напряжения на угол  $\varphi_2 = -90^\circ$ . Чтобы по первому закону Кирхгофа найти ток  $I$  в неразветвленной части цепи, надо по правилу параллелограмма найти вектор  $I = I_1 + I_2$  и длину  $I$  вектора  $I$  определить по масштабному коэффициенту (см. рис. 3.14).

Аналитически это проще сделать, используя баланс мощностей. Активная мощность цепи - это арифметическая сумма активных мощностей всех приемников, а реактивная мощность цепи - разность суммы всех индуктивных мощностей и суммы всех емкостных мощностей.

Для схемы на рис. 3.13 активная мощность цепи равна активной мощности первой ветви  $P = R I_1^2$ , а реактивная мощность всей цепи  $Q = Q_L - Q_C = X_L I_1^2 - X_C I_2^2$ . Значит, согласно выражению (3.18) можно найти полную мощность цепи  $S$ . Тогда в соответствии с соотношением (3.19) ток

$$I = S/U. \quad (3.25)$$

Коэффициент мощности цепи согласно выражению (3.20)

$$\cos \varphi = P/S. \quad (3.26)$$

Вектор тока  $I$  представляют двумя составляющими (см. рис. 3.14): активной  $I_a$ , совпадающей с вектором напряжения  $U$ , причем  $I_a = I \cos \varphi$ ; реактивной  $I_p$ , перпендикулярной вектору  $U$ , при этом  $I_p = I \sin \varphi$ .

Продолжая расчеты в последнем численном примере, можно найти, что активная мощность первой ветви и всей цепи  $P = 6 \cdot 22^2 = 2904 \text{ Вт} \approx 2,9 \text{ кВт}$ . Индуктивная мощность первой ветви  $Q_L = 8 \cdot 22^2 = 3872 \text{ В} \cdot \text{Ар} \approx 3,9 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$ , а емкостная мощность второй ветви  $Q_C = 22 \cdot 10^2 = 2200 \text{ В} \cdot \text{Ар} = 2,2 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$ . Реактивная мощность цепи  $Q = 3,9 - 2,2 = 1,7 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$ . Полная мощность цепи  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2,9^2 + 1,7^2} = 3,36 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ . Согласно выражениям (3.25) и (3.26) ток  $I = 3360/220 = 15,3 \text{ А}$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi = 2,9/3,36 = 0,86$ .

Если, как в рассмотренном примере, индуктивная мощность  $Q_L$  первой ветви больше емкостной мощности  $Q_C$  второй ветви, то цепь представляет активно-индуктивную нагрузку и ток отстает от напряжения. При  $Q_L < Q_C$  нагрузка носит активно-емкостный характер, и ток опережает напряжение.

В цепи с параллельными ветвями, содержащими индуктивный и емкостный элементы, возникает резонанс токов, если индуктивная мощность равна емкостной, т.е. при условии  $Q_L = Q_C$ . В таком состоянии реактивная мощность цепи  $Q_{\text{рез}} = 0$ , полная мощность численно равна активной мощности, общий ток наименьший и совпадает по фазе с напряжением, а для источника питания цепь – это активная нагрузка ( $\varphi_{\text{рез}} = 0$ ;  $\cos \varphi_{\text{рез}} = 1$ ). Благодаря резонансу токов в цепях переменного тока повышают коэффициент мощности потребителей, снижая потери энергии в линиях электроснабжения.

# ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

## 4.1. Устройство и области применения трехфазных цепей

**Трехфазные цепи** разработаны русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским в 1888-1889 гг. Они стали основой электрификации и служат для передачи больших потоков энергии на дальние расстояния, а также для распределения энергии между предприятиями и отдельными потребителями.

Для трехфазных цепей понятие фазы также означает часть цепи, имеющей начало и конец. В трехфазной цепи действуют три переменные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$ . В принципе такую трехфазную систему ЭДС можно создать в трех одинаковых витках (см. рис. 3.2), которые смещены в пространстве относительно друг друга на угол  $120^\circ$  и вместе равномерно вращаются вокруг общей оси в неподвижном магнитном поле.

В действительности трехфазную систему ЭДС получают несколько иначе, с помощью синхронных генераторов, установленных на электростанциях.

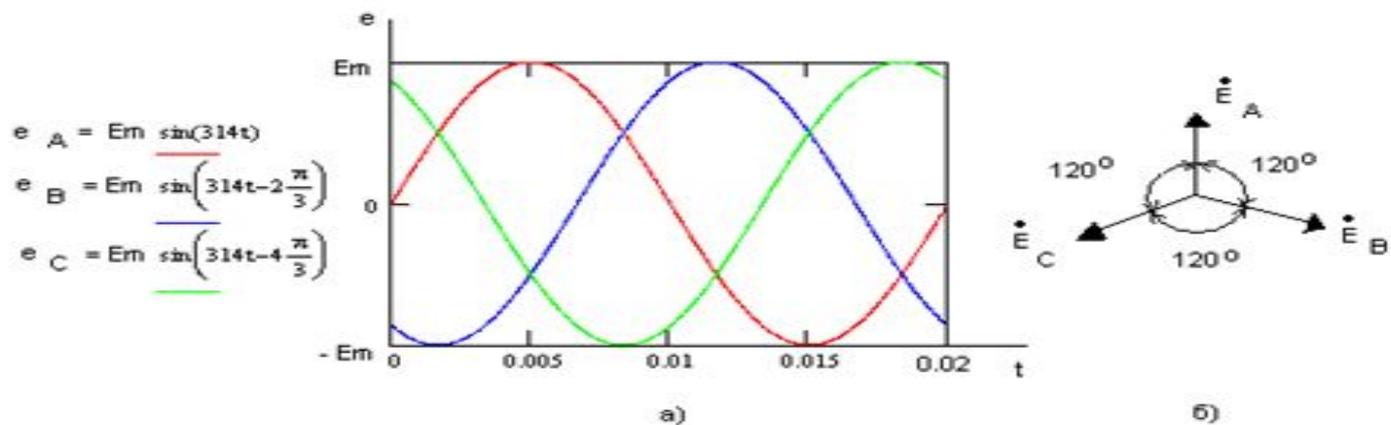


Рис.4.1. Трёхфазная система ЭДС: а) временные зависимости; б) векторная диаграмма.

В каждой из трех обмоток синхронного генератора наводится однофазная ЭДС одной из трех фаз А, В и С. Эти ЭДС  $e_A$ ,  $e_B$  и  $e_C$  (рис.4.1, а) имеют одинако-

вые частоту (50 Гц), амплитуду и действующее значение, а также сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$ . Такие ЭДС образуют **симметричную трехфазную систему**. Им соответствует векторная диаграмма на рис. 4.1, б.

Если каждую однофазную ЭДС подключить только к своей нагрузке, то образуется несвязанная трехфазная цепь, состоящая из трех независимых однофазных цепей. Для соединения нагрузок с генераторами потребуется 6 проводов. Расход проводниковых материалов на линии передачи электрической энергии остается таким же, как в однофазных цепях, – по два провода на фазу.

На рис. 4.2 показаны обмотки 1 синхронного генератора фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ , в которых наводятся ЭДС  $e_A$ ,  $e_B$  и  $e_C$ . Их положительные направления условно обозначены стрелками  $E_A$ ,  $E_B$  и  $E_C$ . В несвязанной трехфазной цепи обмотки фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  подключены к одноименным фазам нагрузки  $Z_A$ ,  $Z_B$  и  $Z_C$ . Положительные направления напряжений на фазах

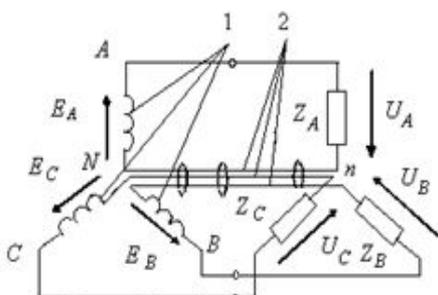


Рис. 4.2. Схема трех несвязанных однофазных цепей

нагрузки условно обозначены стрелками  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ . Поскольку сопротивление соединительных проводов мало, то согласно второму закону Кирхгофа напряжения на фазах генератора те же, что и на нагрузке. Для напряжений на нагрузке справедлива векторная диаграмма на рис. 4.1, б, и они также образуют симметричную трехфазную систему.

Если три провода 2 заменить одним проводом  $N$  (см. рис. 4.2), то возникает **связанная трехфазная цепь**, в которой фазы перестают быть независимыми. В таком случае для передачи энергии от генератора к нагрузкам достаточно четыре провода, благодаря чему сберегаются проводниковые материалы.

Такие связанные цепи – основа систем электроснабжения. На электростанциях трансформаторы повышают напряжение, чтобы снизить потери в линиях электропередачи. Этими линиями генераторы и приемники объединяются

в единую систему. В местах потребления энергии устанавливаются трансформаторы, понижающие напряжение обычно до 220 и 380 В.

Энергия трехфазного тока широко используется в народном хозяйстве, в том числе для преобразования в тепловую энергию и для освещения, для получения энергии постоянного тока. Бытовые однофазные цепи электроснабжения представляют часть трехфазных цепей.

Широкое распространение трехфазных цепей объясняется также и замечательным свойством трехфазного тока – создавать вращающееся магнитное поле. Это позволило построить трехфазные асинхронные двигатели, отличающиеся высокой надежностью и выполняющие значительную долю механической работы в промышленности.

#### 4.2. Четырехпроводная и трехпроводная цепи при соединении приемников в звезду

В производственных условиях энергия потребляется из промышленной трехфазной сети. Сеть – это электрически соединенная часть системы распределения электроэнергии одного уровня напряжения. В данном случае (рис. 4.3) сеть образуется проводами фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  и нейтральным проводом  $N$  (см. рис.

4.2), который заменил три провода в несвязанных цепях.

Нагрузка  $Z_A$ ,  $Z_B$  и  $Z_C$  оказывается включенной в **четырехпроводную звезду**, обозначаемую знаком  $Y_N$ . С сетью начала фаз нагрузка связана тремя линейными проводами фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Нейтральный провод соединяет нейтральные точки сети  $N$  и фаз нагрузки  $n$ . Последняя – общая точка трех концов фаз нагрузки.

Фазы обозначают буквами  $A$ ,  $B$

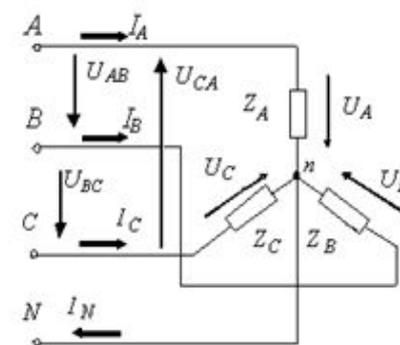


Рис. 4.3. Трехфазная цепь при соединении нагрузки в четырехпроводную звезду

и  $C$ . Соответственно различают **фазные** и **линейные величины**, помечаемые соответствующими

нижними индексами. Фазными величинами называют те, которые относятся непосредственно к фазам нагрузки, а линейные – к питающим линиям.

Линейные токи измеряют в проводах питающих линий  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$ . Поскольку эти провода и соответствующие фазы нагрузки составляют единые ветви, то для звезды фазные токи (индекс ф) равны линейным (индекс л):

$$I_\phi = I_\pi. \quad (4.1)$$

Фазными являются напряжения  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  (см. рис. 4.3), при симметричном питании равные соответствующим ЭДС (см. рис. 4.2):

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi. \quad (4.2)$$

Линейные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ , в данном случае отличающиеся от фазных, измеряют между линейными проводами  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Связь между фазными и линейными напряжениями можно установить, если воспользоваться вторым законом Кирхгофа в векторной форме. Например, при обходе против часовой стрелки, контура, обозначенного на рис. 4.3 пунктирной линией,  $0 = U_{AB} + U_B - U_A$ . Значит, вектор линейного напряжения

$$U_{AB} = U_A - U_B,$$

т.е. представляет сумму векторов фазных напряжений  $U_A + (-U_B)$ .

На рис. 4.4 показано построение вектора  $U_{AB}$  по заданным векторам фазных напряжений  $U_A$  и  $U_B$ , которые совпадают с соответствующими векторами ЭДС  $E_A$  и  $E_B$  (см. рис. 4.1, б). Вектор  $U_{AB}$  (обозначен пунктирной стрелкой) найден сложением векторов  $U_A$  и  $(-U_B)$ . Векторы  $U_B$  и  $(-U_B)$  равны по длине, параллельны, но проти-

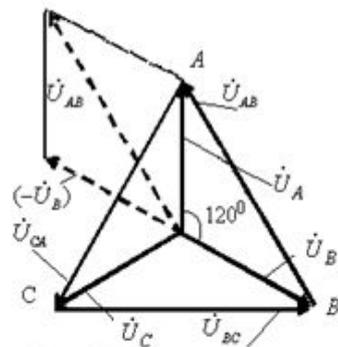


Рис. 4.4. Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений для четырехпроводной звезды

воположно направлены. Затем вектор  $U_{AB}$  параллельно перенесен на концы векторов фазных напряжений  $U_A$  и  $U_B$ . Подобным же образом получены выражения для двух других векторов линейных напряжений

$$U_{BC} = U_B - U_C \text{ и } U_{CA} = U_C - U_A,$$

которые также изображены на векторной диаграмме рис. 4.4.

Векторы линейных напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$  образуют равносторонний треугольник. Из его центра под углами  $120^\circ$  расходятся векторы фазных напряжений  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$ . Линейные напряжения, как и фазные, одинаковые:

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\pi.$$

Отношение между действующими линейным и фазным напряжениями определяют по равнобедренному треугольнику (см. рис. 4.4) с углом при вершине  $120^\circ$ . Длина основания треугольника представляет линейное напряжение  $U_\pi$ , а длина боковых сторон – фазное  $U_\phi$ . Из геометрических соображений получено соотношение, справедливое для любых режимов четырехпроводной звезды:

$$U_\pi = \sqrt{3} U_\phi \approx 1,73 U_\phi. \quad (4.3)$$

Напряжения для четырехпроводной звезды обозначают дробью: в числителе указывают линейное напряжение, в знаменателе – фазное. В трехфазных сетях номинальные линейные напряжения до 1000 В такие же, как и в однофазных: 220, 380 и 660 В. В цеховых сетях промышленных предприятий, а также в жилых домах и общественных зданиях напряжения 380/220 В.

Нагрузкой в трехфазных цепях могут быть как однофазные потребители, например, осветительные или нагревательные приборы, так и трехфазные – асинхронные двигатели, выпрямители и др.

Различают симметричную и несимметричную трехфазную нагрузку. При симметричной нагрузке полные сопротивления и сдвиги фаз приемников одинаковые (помечаются индексом ф):

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z_\phi;$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_\phi.$$

Фазные токи непосредственно задаются соответствующими фазными напряжениями. При симметричной нагрузке согласно закону Ома (3.14) все действующие фазные токи одинаковые, сдвинуты относительно своих фазных напряжений на один и тот же угол  $\varphi_\Phi$ . Расчет цепи при симметричной нагрузке ведут по одной фазе. С учетом выражения (4.3):

$$I_A = I_B = I_C = I_\Phi = U_\Phi / Z_\Phi = U_N / \sqrt{3} Z_\Phi. \quad (4.4)$$

**Пример.** По схеме четырехпроводной звезды в каждую фазу нагрузки включены одинаковые осветительные приборы с сопротивлением  $R_\Phi = 110$  Ом, фазное напряжение  $U_\Phi = 220$  В. Надо рассчитать действующие фазные (линейные) токи и построить векторную диаграмму.

В данном случае нагрузка симметричная и активная. Согласно выражению (4.4) фазные токи  $I_\Phi = 220/110 = 2$  А. Коэффициент мощности  $\cos \varphi_\Phi = 1$ , а угол

$\varphi_\Phi = 0$ . Каждый фазный ток совпадает по фазе со своим фазным напряжением, что показано на векторной диаграмме (рис. 4.5), построенной для данного случая. Все векторы фазных токов одинаковы по длине и сдвинуты по фазе друг от друга на  $120^\circ$ , составляя симметричную трехфазную систему. При симметричной активно-индуктивной нагрузке векторы фазных токов отстают от своих фазных напряжений на угол  $\varphi_\Phi$ , а при активно-емкостной

нагрузке опережают эти напряжения на соответствующий угол  $\varphi_\Phi$ .

При любой симметричной нагрузке фазные токи всегда образуют симметричную систему. Одно из ее свойств – сумма всех ее векторов равна нулю. Ток  $I_N$  в нейтральном проводе определяется по первому закону Кирхгофа, записанному для нейтральной точки нагрузки  $n$  (см. рис. 4.3) в векторной форме:

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0. \quad (4.5)$$

Следовательно, при **симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе**

**отсутствует.**

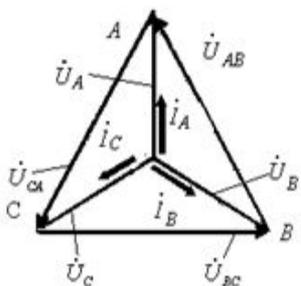


Рис. 4.5. Векторная диаграмма для четырехпроводной звезды при симметричной активной нагрузке

Если удалить нейтральный провод, в котором нет тока, то нагрузка оказывается соединенной в **трехпроводную звезду** (условное обозначение  $Y$ ). Но состояние цепи не изменится. Остаются справедливыми как соотношения (4.2), (4.3) и (4.4), так и векторная диаграмма (см. рис. 4.5).

Для трехпроводных цепей указывают только линейное напряжение. Эти цепи применяют лишь при симметричной нагрузке, например, для питания трехфазных приемников в виде асинхронных двигателей, выпрямителей и проч.

Трехпроводные цепи служат для передачи электроэнергии на дальние расстояния и электроснабжения предприятий, городов и других крупных потребителей при напряжении свыше 1000 В. Электроснабжение предприятий выполняется обычно при напряжениях 6, 10, 17 и 35 кВ, а передача электроэнергии – при еще более высоких напряжениях, например, 110 и 220 кВ.

При **несимметричной нагрузке** полные сопротивления и (или) коэффициенты мощности в фазах неодинаковые. Это объясняется тем, что однофазные приемники, работающие в разных фазах и рассчитанные на одно и то же номинальное напряжение, равное фазному, отличаются мощностью или коэффициентом мощности и могут независимо от других включаться либо выключаться.

**Трехпроводную звезду** нельзя применять при несимметричной нагрузке, т.к. фазные напряжения становятся неравными и соотношение (4.3) не выполняется. Любое фазное напряжение зависит от нагрузки во всех фазах. Отклонение

напряжения от номинального ухудшает показатели работы приемников.

Например, несимметричная активная нагрузка может возникнуть из-за того, что в каждую фазу включено разное количество одинаковых осветительных приборов. Векторная диаграмма для подобного случая дана на рис. 4.6. Действующие токи  $I_A, I_B, I_C$  разные, но векторы токов попрежнему совпадают с

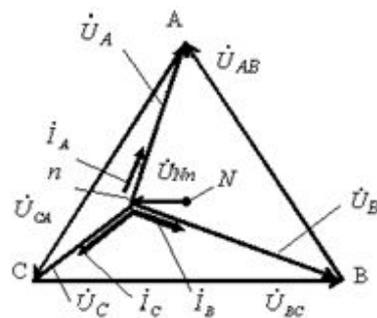


Рис. 4.6. Пример векторной диаграммы для трехпроводной звезды при несимметричной активной нагрузке

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

**Измерение** - это определение опытным путем значения некоторой величины с помощью специальных измерительных средств. Они позволяют сравнить эту величину с принятой единицей ее представления. Измерения и измерительные средства необходимы для управления производственными процессами и объектами, например, для контроля за количеством и качеством сырья, энергии, для обеспечения требуемых свойств конечной продукции, для проверки технического состояния оборудования и режимов его работы.

Свойства продукции и эффективность процесса ее производства в значительной степени определяются качеством измерительных средств.

При ручном управлении процессами и объектами измерительные средства отображают определяемые величины в виде, удобном для восприятия человеком. При автоматизированном управлении измеренная величина передается в средства управления, как правило, электронные цифровые. Поэтому данная величина должна быть представлена электрическими сигналами в цифровой форме. В таком случае измерительные средства снабжаются соответствующими преобразователями.

В промышленности требуется измерять большое количество различных по своей природе величин, обычно аналоговых - непрерывно изменяющихся во времени. Их подразделяют на электрические (напряжение, ток, мощность, частота и другие) и на неэлектрические (температура, масса, размеры, уровень жидкости, скорость перемещения, расход сред и прочее).

Среди разнообразных способов измерения выделяются **электрические измерения**, основанные на закономерностях электромагнитных явлений. Так определяют электрические величины, которые характеризуют состояния процессов и оборудования, в настоящее время широко электрифицированных. Измеряют и неэлектрические величины с преобразованием их в электрические.

Различают прямые и косвенные измерения. При прямом измерении определяемую величину получают непосредственно, а при косвенном - ее рассчитывают по величинам, найденным прямыми измерениями.

Измерительные средства включают в себя меры, приборы, преобразователи, установки и системы.

С помощью мер воспроизводят единицы измерения, например, точно изготовленным резистором задают сопротивление, с которым сравнивают измеряемое.

**Приборы** представляют измеряемую величину в виде, удобном для зрительного восприятия. По способу воспроизведения данных приборы делят на показывающие и регистрирующие, а по способу представления - на аналоговые и цифровые. Аналоговые приборы снабжены шкалами, на которых непрерывное значение измеряемой величины определяют по положению стрелки, луча света и проч. Цифровые приборы данные выдают в численной форме.

Электрические средства измерения просты, надежны и не нарушают нормальной работы установок. Малая инерционность этих средств делает их незаменимыми при контроле быстропротекающих процессов. Электрические способы обеспечивают высокую точность измерений и простоту согласования измерительных средств с управляемыми. Полученные данные можно передавать на большое расстояние или вводить в устройства для обработки данных.

## 5.2. Классы точности аналоговых показывающих приборов

Случайные и систематические погрешности измерения вызываются неточностью градуировки шкалы, трением в подвижных частях прибора, ошибками считывания, влиянием внешних условий и др. Погрешности, возникающие в тех условиях, для которых спроектирован прибор, называют основными.

Абсолютная погрешность прямого измерения - это разность между показанием прибора  $X$  и истинным значением измеряемой величины  $X_n$

$$\Delta X = X - X_n. \quad (5.1)$$

Предполагается, что измерения проводят, не выходя за пределы тех условий, для которых спроектирован прибор. Поэтому такую погрешность считают **основной**. Под истинным значением обычно понимают величину, измеренную значительно более точным средством.

Точность прибора характеризуют **основной приведенной погрешностью**

$$\gamma_{\text{пр}} = (\Delta X/X_N)100\%, \quad (5.2)$$

где  $X_N$  – нормирующее значение прибора.

Если шкала прибора начинается с нуля, то нормирующим значением считают верхний предел измерения этого прибора. В общем случае нормирующее значение – это разность верхнего  $X_{\text{max}}$  и нижнего  $X_{\text{min}}$  пределов измерения.

Наибольшей по модулю основной приведенной погрешностью определяется **класс точности прибора**

$$K \geq |\gamma_{\text{пр}}|_{\text{max}}. \quad (5.3)$$

Согласно стандарту классы точности  $K$  выражаются числами 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Чем меньше основная приведенная погрешность  $|\gamma_{\text{пр}}|_{\text{max}}$ , тем выше класс точности прибора, тем меньше число  $K$ . Наиболее точные приборы – класса 0,05, а самые грубые – класса 4.

Зная класс точности прибора  $K$ , с помощью выражений (5.2) и (5.3) можно оценить пределы, в которых находится истинное значение измеренной величины:

$$X_{\text{и}} = X \pm |\Delta X_{\text{max}}| = X \pm |KX_N/100\%|. \quad (5.4)$$

Эти пределы оказываются более узкими с повышением класса прибора, т.е. с уменьшением числа  $K$ . Точность измерения оценивают относительной погрешностью  $\delta = \Delta X/X$ , абсолютное значение которой ограничено сверху:

$$|\delta| \leq KX_N/X100\%. \quad (5.5)$$

Эта погрешность зависит не только от класса точности прибора, но и от того, в какой части шкалы ведется измерение, т.е. чему равна сама измеряемая величина  $X$ . Чем ближе эта величина к верхнему пределу измерения, тем меньше относительная погрешность. Класс точности прибора выбирают по требуемой погрешности измерения. Обычно технологические процессы контролируют

щитовыми приборами невысокого класса: 1; 1,5; 2,5. Для научных экспериментов, наладки оборудования и поверки рабочих измерительных средств служат лабораторные и образцовые, более точные приборы.

### 5.3. Основные системы аналоговых показывающих приборов

Принципом действия прибора, т.е. явлениями, благодаря которым измеряемая величина преобразуется в положение стрелки на шкале, определяется система прибора. К основным системам относятся магнитоэлектрическая, электромагнитная и электродинамическая.

Приборы **магнитоэлектрической системы** основаны на применении закона электромагнитной силы (см. рис. 2.9), в данном случае на силовом взаимодействии измеряемого тока в рамке с полем постоянного магнита.

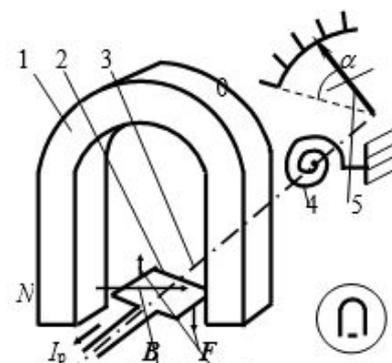


Рис. 5.1. Устройство прибора магнитоэлектрической системы

В воздушном зазоре между полюсами  $N$  и  $S$  постоянного магнита 1 (рис. 5.1) расположена рамка 2, содержащая определенное число витков изолированной проволоки. По рамке проходит измеряемый ток  $I_p$ . Рамка установлена на оси 3, к которой прикреплены спиральная пружина 4 и стрелка 5, перемещающаяся вдоль шкалы. На рамку со стороны магнитного поля действуют пара сил  $F$  и вращающий момент, согласно выражению (2.11) пропорциональный току  $I_p$ .

$$M_{\text{вп}} = c_1 I_p.$$

Постоянная  $c_1$  определяется числом витков и размерами рамки, а также магнитной индукцией поля  $B$ .

Повороту рамки противодействует спиральная пружина, которая создает момент, пропорциональный углу поворота  $\alpha$ .

$$M_{\text{пр}} = c_2 \alpha, \quad (5.6)$$

где  $c_2$  – постоянная, зависящая от жесткости пружины.

Рамка останавливается, когда наступает равновесие при  $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$ .

Стрелка, закрепленная на оси рамки, отклоняется от нуля шкалы на угол  $\alpha$ , пропорциональный току в рамке:

$$\alpha = (c_1/c_2)I_p. \quad (5.7)$$

Таким образом, у магнитоэлектрических приборов шкала равномерная. При смене направления тока в рамке вращающий момент действует в обратную сторону, стрелка отклоняется влево от нуля и прибором с односторонней шкалой пользоваться нельзя. Следовательно, данные приборы полярные: на их зажимах указаны знаки + и -, которые учитывают при подключении приборов в цепь.

Такие приборы применяют в цепях постоянного тока. В цепи переменного тока прибор покажет нуль: средний вращающий момент за один период тока  $I_p$  равен нулю, а из-за инерционности рамки и механической части прибора стрелка не успевает отклоняться с частотой тока. Условное обозначение приборов данной системы показано в кружке на рис. 5.1

Этими приборами измеряют постоянные ток или напряжение (ЭДС), т.е. их применяют как амперметры или вольтметры.

В амперметре по рамке протекает непосредственно измеряемый ток  $I_x$ , и амперметр включают последовательно с нагрузкой, в которой надо определить ток. Чтобы подключение амперметра не влияло на состояние цепи, его сопротивление должно быть намного меньше, чем нагрузки.

В вольтметре ток в рамке  $I_p = U_x / R_v$ , где  $U_x$  – измеряемое напряжение, а  $R_v$  – сопротивление вольтметра, т.е. всей его измерительной цепи, включая рамку. Угол отклонения стрелки оказывается пропорциональным напряжению. Вольтметр подсоединяют параллельно нагрузке, на которой надо определить напряжение. Чтобы подключение вольтметра не влияло на состояние цепи, его сопротивление должно быть намного больше, чем у нагрузки.

Работа приборов электромагнитной системы основана на силовом взаимодействии магнитного поля, созданного током, с лепестком из магнитомягкого материала, который намагничивается этим полем.

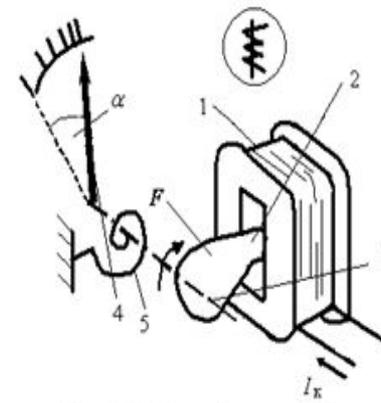


Рис. 5.2. Устройство прибора электромагнитной системы

По обмотке катушки 1 протекает определяемый ток  $I_k$ . Ток создает магнитное поле, которое намагничивает лепесток 2, установленный на оси 3. К оси прикреплены спиральная пружина 4 и стрелка 5, перемещающаяся вдоль шкалы.

Электромагнитной силой  $F$  лепесток втягивается в щель катушки, и стрелка поворачивается на угол  $\alpha$ . Сила  $F$

пропорциональна квадрату индукции магнитного поля. Поскольку это поле создается практически в воздушной среде, то индукция линейно зависит от тока в катушке  $I_k$ . Следовательно, сила  $F$  и вращающий момент  $M_{\text{вр}}$ , действующий на лепесток, пропорциональны квадрату тока:

$$M_{\text{вр}} = c_1 I_k^2. \quad (5.8)$$

Этот момент не зависит от знака (направления) тока. Когда вращающий момент уравновешен моментом сопротивления пружины, то согласно выражениям (5.7) и (5.8) угол отклонения оказывается пропорциональным квадрату тока в катушке:

$$\alpha = (c_1/c_2)I_k^2. \quad (5.9)$$

Шкала прибора неравномерная - квадратичная. Приборы электромагнитной системы применяют для измерений в цепях переменного тока, их шкала градуируется в значениях действующего тока  $I_k$ . В амперметре ток в катушке  $I_k$  равен измеряемому току  $I_x$ , а в вольтметре  $I_k = U_x / R_v$ , где  $U_x$  – определяемое

напряжение,  $R_b$  – сопротивление измерительной цепи прибора. Условное обозначение приборов электромагнитной системы показано в кружке на рис. 5.2.

Работа приборов **электродинамической системы** основана на силовом взаимодействии двух токов, объясняемом тем, что на любой из токов действует магнитное поле, созданное другим током. Этими приборами измеряют мощность потребления энергии в цепях постоянного и переменного тока, т.е. применяют их как ваттметры. Для примера рассмотрена работа прибора в цепи постоянного тока.

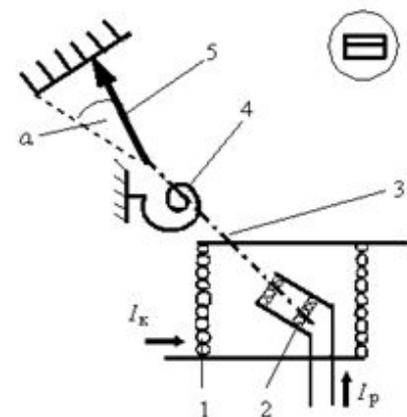


Рис. 5.3. Устройство прибора электродинамической системы

Прибор состоит из неподвижной катушки 1 (рис. 5.3), где протекает ток  $I_k$ , и поворачивающейся рамки 2 с током  $I_p$ , размещенной внутри катушки. Рамка установлена на оси 3. С ней связаны спиральная пружина 4 и стрелка 5, перемещающаяся вдоль шкалы.

Магнитная индукция поля катушки  $B_k$  пропорциональна току  $I_k$ , так как магнитное поле возникает практически в воздушной среде, и значит,  $B_k = c_k I_k$ , где  $c_k$  – постоянная. Магнитное поле катушки создает силу, действующую на ток в рамке  $I_p$ , и, значит, вращающий момент, поворачивающий рамку вокруг оси.

С учетом закона электромагнитной силы (2.9) вращающий момент  $M_{вр} = c_1 I_k I_p$ . Когда он уравновешен моментом сопротивления пружины, задаваемым выражением (5.6), то стрелка отклоняется на угол

$$\alpha = c_1 c_2 I_k I_p.$$

В катушке, включенной последовательно с нагрузкой, протекает ток нагрузки  $I_x$ . На рамку поступает напряжение на нагрузке  $U_x$ , ток в рамке  $I_p = U_x / R_p$ , где  $R_p$  – сопротивление цепи рамки. Если оба тока подставить в по-

следнее выражение и учесть, что произведение  $U_x I_x = P_x$  – измеряемая мощность нагрузки, то угол отклонения стрелки

$$\alpha = c_1 c_2 (1/R_p) P_x. \quad (5.10)$$

В цепи переменного тока прибором измеряют активную мощность, т.к.

$$\alpha = c_1 c_2 (1/R_p) U_x I_x \cos \varphi = c_1 c_2 P_x, \quad (5.11)$$

где  $P_x = U_x I_x \cos \varphi$  – активная мощность нагрузки.

Шкала ваттметра равномерная. У него четыре зажима: два принадлежат неподвижной катушке (токовой катушке), которую включают как амперметр, а два – подвижной рамке (катушке напряжения), которую подсоединяют как вольтметр. Условное обозначение приборов электродинамической системы показано в кружке на рис. 5.3.

Применяют приборы и других систем, в частности счетчики электрической энергии переменного тока, измеряющие потребляемую энергию в кВт·ч.

Современные приборы оснащаются цифровыми индикаторами, которые измеренную величину представляют в числовой форме. Такие приборы содержат электронные преобразователи на микросхемах и могут работать на иных принципах измерения. Цифровые приборы отличаются быстродействием и высокой точностью. Предотвращаются грубые ошибки, возникающие при считывании показаний со шкалы аналоговых приборов. Данные с цифровых приборов можно записывать и передавать средствам автоматического управления.

#### 5.4. Измерения тока, напряжения и активной мощности в электрических цепях

На рис. 5.4 – обобщенная схема измерений тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и однофазного переменного тока, например, на нагрузке  $R$ .

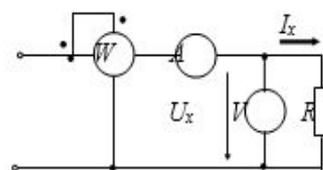


Рис. 5.4. Схема включения измерительных приборов

Для измерения тока  $I_x$  последовательно с нагрузкой включают **амперметр А** (см рис. 5.4), сопротивление которого должно быть намного меньше, чем у нагрузки, чтобы при измерении не наруша-

лось состояние цепи. Сопротивление амперметров - сотые доли ома. Напряжение  $U_x$  измеряют **вольтметром**

(см. рис. 5.4), подключаемым параллельно нагрузке  $R$ . Чтобы не изменялось состояние цепи, подбирают вольтметр с сопротивлением, намного большим, чем у нагрузки. Сопротивление вольтметров составляет обычно несколько килоом.

В цепях постоянного тока применяют амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы, а в цепях переменного тока – электромагнитные.

По напряжению и току косвенно измеряют сопротивление резистора или полное сопротивление нагрузки, рассчитывая их по закону Ома (1.2) или (3.14).

Мощность измеряют **ваттметром**  $W$  (см. рис. 5.4), токовую катушку которого подсоединяют последовательно, а катушку напряжения – параллельно нагрузке.

Чтобы стрелка отклонялась вправо от нуля, зажимы обеих катушек, отмеченные знаками (•), соединяют и включают со стороны генератора, а не нагрузки. В многопредельных приборах пределы измерения задают включением соответствующих катушек тока и напряжения. Перед измерениями надо определить цену деления шкалы (Вт/дел)

$$C_W = U_N I_N / \alpha_{max}$$

где  $U_N$  и  $I_N$  – пределы измерения по току и напряжению;

$\alpha_{max}$  – число делений шкалы.

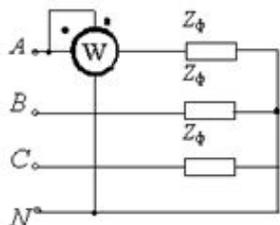


Рис. 5.5. Измерение мощности симметричной нагрузки одним ваттметром

В трехфазной цепи при симметричной нагрузке  $Z_\phi$  и доступной нейтральной точке достаточно измерить мощность любой фазы одним ваттметром: мощность нагрузки в три раза больше показания прибора (рис. 5.5).

В четырехпроводной цепи мощность несимметричной нагрузки можно измерить тремя ваттметрами. На их катушки напряжения подают

фазные напряжения тех фаз, в которые включены токовые катушки. Мощность нагрузки равна сумме показаний всех ваттметров.

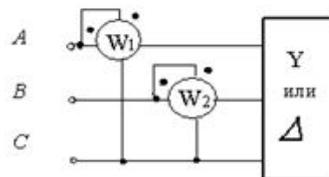


Рис. 5.6. Схема измерения мощности в трехфазной цепи двумя ваттметрами

В трехпроводной цепи для измерения мощности симметричной и несимметричной нагрузки достаточно двух ваттметров (рис. 5.6): согласно первому

закону Кирхгофа любой линейный ток определяется через два других. Токовые катушки ват-

тмет-

ров включают в два линейных провода любых фаз, а катушки напряжения – между этими проводами и третьим, незадействованным. Мощность нагрузки равна алгебраической сумме показаний обоих приборов.

В трехфазном ваттметре на одной оси установлены два или три измерительных электродинамических механизма. Угол отклонения стрелки пропорционален алгебраической сумме вращающих моментов.

## Задание на самостоятельную работу

### Литература:

1. Зевеке Г.В., Ионкин А.В., Страков С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов, - М.: Энергоатомиздат, 1999 г, с. 9 –21.
2. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов, - М.: Радио и связь, 1999 г, с. 7 –19.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебник для вузов, - М.: Высшая школа, 2003 г, с. 2 –21.