

В. Е. ЗАЙЦЕВ, Т. А. НЕСТЕРОВА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК

Допущено

*Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов образовательных учреждений
среднего профессионального образования, обучающихся по группе
специальностей 270000 «Строительство и архитектура»*

7-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2010

УДК 621.3
ББК 31.21
3-17

Рецензенты:

зав. кафедрой электроснабжения предприятий Смоленского филиала
Московского энергетического института (университета) д-р техн. наук

В. П. Кавченков;

доцент кафедры электроснабжения предприятий Смоленского филиала
Московского энергетического института (университета) канд. техн. наук

А. И. Артемов

Зайцев В. Е.

3-17 Электротехника. Электроснабжение, электротехнология и электрооборудование строительных площадок : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В. Е. Зайцев, Т. А. Нестерова. — 7-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 128 с.

ISBN 978-5-7695-7501-3

Излагаются основные сведения по электротехнике, электрическим машинам, электроснабжению, электротехнологии на строительной площадке. Рассмотрены общие вопросы электробезопасности и мероприятия по обеспечению безопасного ведения работ с электроустановками.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.3

Учебное издание

ББК 31.21

Зайцев Владимир Евгеньевич, Нестерова Тамара Анатольевна

**Электротехника. Электроснабжение, электротехнология
и электрооборудование строительных площадок**

Учебное пособие

7-е издание, стереотипное

Редактор *Н. Н. Согомонян*. Технический редактор *Е. Ф. Коржуева*
Компьютерная верстка: *Ю. А. Кособоков*. Корректор *И. В. Мочалова*

Изд. № 107102315. Подписано в печать 25.05.2010. Формат 60×90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 8,0. Тираж 1 500 экз. Заказ № Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
125252, Москва, ул. Зорге, д. 15, корп. 1, пом. 26 б.

Адрес для корреспонденции: 129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1, а/я 48.
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.60.953.Д.007831.07.09 от 06.07.2009.
Отпечатано с электронных носителей, предоставленных издательством,
в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат». www.sarprk.ru
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Зайцев В. Е., Нестерова Т. А., 2001

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2004

ISBN 978-5-7695-7501-3

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электротехника, электротехнология и электроснабжение — области человеческих знаний и практики, которые быстро развиваются. Поэтому специалисту необходимо постоянно пополнять свои знания в области электротехнологий и использовать их в своей практической деятельности.

Данное учебное пособие отличается не столь подробным изложением теоретического материала, как специальные учебники, но затрагивает множество электротехнических аспектов, которые необходимо изложить в едином стиле, при единой терминологии и в едином физическом освещении явлений и принципов действия электроустановок строительных процессов.

Рассмотрение многих вопросов базируется на первичных знаниях курса физики, полученных в процессе изучения законов преобразования энергии, принципов работы электрических цепей постоянного тока и трехфазных цепей переменного тока промышленной частоты.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

1.1. Постоянный электрический ток

Постоянным электрическим током называют направленное упорядоченное движение элементарных (материальных) частиц, несущих электрические заряды. При этом в металлах (металлических проводниках), а также в вакууме движутся отрицательно заряженные частицы — электроны, а в жидкостях (растворах солей и кислот) — как отрицательно, так и положительно заряженные материальные частицы — ионы, перемещающиеся в противоположных направлениях (навстречу друг другу). В разреженных газах электрический ток может осуществляться движением как электронов, так и ионов.

Постоянный ток — *не изменяется во времени, т.е. постоянен по направлению и величине*. За направление постоянного тока принимают направление движения положительно заряженных частиц. Отсюда следует, что в металлических проводниках, а также в вакууме и в газах направление тока принимается противоположным направлению движения электронов.

Простейшие цепи постоянного тока. Простейшая цепь постоянного электрического тока состоит из следующих элементов:

- источника электроэнергии;
- электроприемника (потребителя энергии);
- проводов.

Кроме того, в цепь тока обычно включаются измерительные приборы и те или иные аппараты для включения и отключения тока.

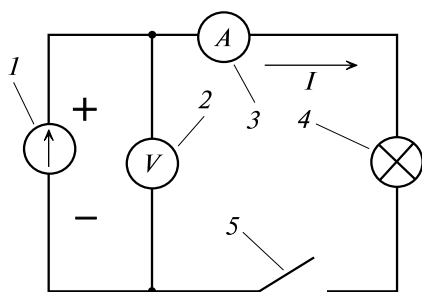


Рис. 1.1. Схема цепи постоянного тока:

- 1 — источник тока; 2 — вольтметр;
- 3 — амперметр; 4 — электрическая лампа;
- 5 — выключатель

Изображение электрической цепи с помощью условных графических обозначений называют электрической схемой (рис. 1.1).

Всякий источник электроэнергии обладает электродвижущей силой (ЭДС), под воздействием которой в нем возникает движение элементарных частиц, несущих электрические заряды, и создается разность потенциалов на его полюсах. Электродвижущая сила обозначается латинскими буквами *E* или *e*.

Разность электрических потенциалов между полюсами источника тока, под действием которой во внешней цепи протекает электрический ток, называется электрическим напряжением, действующим в данной цепи. Напряжение обозначается латинской буквой U . Единица измерения ЭДС и напряжения — вольт (В). Приборы для их измерения называют вольтметрами.

Сила электрического тока обозначается буквой I и измеряется в амперах (А). Прибор для измерения силы тока называют амперметром.

Электрический ток может протекать по цепи только, когда она замкнута, т. е. когда обеспечен непрерывный путь для электрических зарядов от «плюса» источника тока до «минуса» (см. рис. 1.1). Поэтому в данном случае для того, чтобы в цепи появился ток, необходимо замкнуть выключатель 5. Наличие тока в цепи обнаружится по загоранию электрической лампы 4 и показанию амперметра 3. Значение напряжения в цепи определяется по показанию вольтметра 2. Если разомкнуть выключатель 5 и этим разорвать электрическую цепь, ток в ней прекратится, лампа погаснет, стрелка амперметра станет на нуль.

Работа и мощность постоянного тока. Мощность постоянного электрического тока определяется произведением напряжения U , действующего в цепи, на ток I , протекающий по цепи. Единица измерения мощности — ватт (Вт).

Мощность обозначается буквой P и определяется по формуле

$$P = UI. \quad (1.1)$$

При измерении напряжения в вольтах, а тока в амперах величина мощности выразится в ваттах.

Работа электрического тока (A), равная количеству затраченной за данное время электрической энергии, определяется по формуле

$$A = Pt = UI t, \quad (1.2)$$

где P — мощность постоянного электрического тока, Вт; t — время, в течение которого эта мощность отдавалась, с; U — напряжение, действующее в цепи, В; I — сила тока, А.

Работа электрического тока, определяемая по формуле (1.2), выражается в джоулях (Дж) или киловатт-часах (кВт·ч). Легко подсчитать, что 1 кВт·ч равен 3600000 Дж.

1.2. Проводники, полупроводники и диэлектрики

Способность какого-либо вещества проводить электрический ток называется электропроводностью. В отношении электропроводности все вещества — твердые, жидкие и газообразные — могут быть подразделены на три группы:

Проводники — вещества, обладающие высокой электропроводностью. К ним относятся все металлы, уголь, графит, водные растворы кислот, щелочей и солей.

Диэлектрики — вещества, обладающие весьма малой электропроводностью. К ним относятся такие материалы, как стекло, фарфор, слюда, резина, многие пластмассы (полиэтилен, полихлорвинил, полистирол и др.), минеральные и растительные масла, а также дистиллированная вода и сухой воздух.

Полупроводники — вещества, занимающие промежуточное положение между первой и второй группами. К ним относятся некоторые химические элементы: селен, германий, кремний, окислы отдельных металлов, например закись меди, а также специальные сплавы. Полупроводники широко применяются в различных областях электротехники, особенно в электронике.

1.3. Закон Ома

Одним из основных законов электротехники является закон Ома, определяющий зависимость силы тока, протекающего в цепи, от действующего в ней напряжения и сопротивления: **сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к этому участку, и обратно пропорциональна сопротивлению участка.**

Согласно определению закон Ома может быть выражен формулой

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.3)$$

где I — сила тока, А; U — напряжение, В; R — сопротивление, Ом.

Зная две величины из трех, входящих в формулу (1.3), можно определить третью.

1.4. Виды соединений проводников (сопротивлений)

Как правило, всякая электрическая цепь состоит из нескольких сопротивлений, включенных в нее тем или иным способом.

Основные типы соединения сопротивлений — последовательное и параллельное.

Последовательное соединение. Последовательным называется такое соединение, при котором конец первого проводника (сопротивления) соединен с началом второго, а конец второго — с началом третьего и т. д. (рис. 1.2, а).

Параллельное соединение. При параллельном соединении все начала проводников (сопротивлений) соединены вместе и также соединены их концы (рис. 1.2, б).

Последовательное соединение сопротивлений увеличивает общее сопротивление электрической цепи, а параллельное — уменьшает его.

Общее суммарное сопротивление последовательно включенных сопротивлений равно их сумме (рис. 1.2, а):

$$R_{\text{общ}} = R1 + R2 + R3. \quad (1.4)$$

Для определения общего суммарного сопротивления параллельно включенных сопротивлений (рис. 1.2, б) необходимо сложить не сопротивления, а их проводимости (т.е. величины, обратные сопротивлениям), найдя тем самым суммарную проводимость цепи — $g_{\text{общ}}$, равную $1/R_{\text{общ}}$. По суммарной проводимости легко определяется суммарное сопротивление $R_{\text{общ}}$. Так для схемы рис. 1.2, б можно написать:

$$R_{\text{общ}} = \frac{1}{g_{\text{общ}}}, \quad (1.5)$$

$$g_{\text{общ}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3}. \quad (1.6)$$

При параллельном включении нескольких одинаковых по величине сопротивлений их суммарное значение равно сопротивлению одного, деленному на их количество. Формулы (1.4), (1.5) и (1.6) остаются в силе при любом количестве последовательно или параллельно включаемых сопротивлений, соответственно изменяется лишь число слагаемых в них.

Смешанное соединение. Обычно в электрических цепях одновременно содержатся оба рассмотренных типа соединений проводников: и параллельное, и последовательное. Такие цепи называют цепями со смешанным соединением сопротивлений.

1.5. Нагревание проводов током и потери электроэнергии

Тепловое действие электрического тока играет в электротехнике двоякую роль. С одной стороны, способность электроэнергии легко преобразовываться в тепловую энергию широко используют в различных областях народного хозяйства для устройства электрических печей и нагревательных приборов. В частности, на строительстве при работах в зимнее время применяют электропрогрев бетона и замерзшего грунта, электроотопгрев замерзших трубопроводов (с использованием переменного тока), сушку штукатурки электролампами и электровоздуховками. С другой стороны, на-

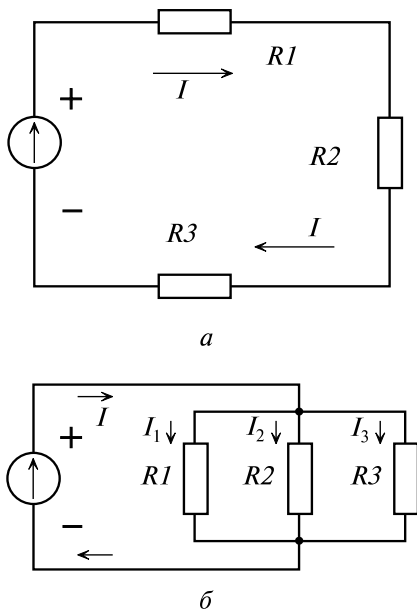


Рис. 1.2. Последовательное (а) и параллельное (б) соединения сопротивлений

нагрев током проводов при передаче электрической энергии и нагрев обмоток электрических машин при их работе представляет собой отрицательное явление, так как создает бесполезные затраты — потери электрической энергии, а при чрезмерной загрузке проводов током грозит преждевременным выходом из строя электроизоляции проводов и пожаром.

При работе любой электроустановки нагрев проводов током вызывает, как уже отмечалось, потери электрической энергии, размер которых определяется в соответствии с законом Джоуля—Ленца. В частности, потери электроэнергии ΔA (Вт·ч) и электрической мощности ΔP (Вт) при передаче энергии постоянным током определяют по следующим формулам:

$$\Delta A = 2I^2 Rt, \quad (1.7)$$

$$\Delta P = 2I^2 R, \quad (1.8)$$

где I — сила тока, протекающего по проводам, А; R — сопротивление одного провода, Ом; t — время протекания тока, ч.

1.6. Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции

Если поместить замкнутый проводник в изменяющееся магнитное поле, то в нем будет наводиться электрический ток, называемый индукционным (наведенным). Причиной возникновения тока является сила Лоренца, выполняющая роль сторонней силы, приводящей заряженные частицы (электроны) в направленное движение. Все это приводит к понятию электродвижущей силы индукции:

$$E_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1.9)$$

Электродвижущая сила, возникающая в проводнике, вокруг которого изменяется магнитное поле, пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

Индукцированный ток в проводнике, помещенном в изменяющееся магнитное поле, всегда имеет такое направление, что магнитное поле индукцированного тока всегда препятствует изменению магнитного поля, вызвавшего этот ток (Правило Ленца).

1.7. Переменный однофазный ток

Переменным называют электрический ток, периодически (т.е. через равные промежутки времени) меняющий свое направление и непрерывно изменяющийся по величине. Мгновенные значения

переменного тока (а также переменной ЭДС и напряжения) через равные промежутки времени повторяются.

Переменный ток имеет самое широкое применение в современной электротехнике. Практически вся электрификация во всем мире осуществляется на переменном токе (на трехфазном переменном токе, о котором изложено далее).

Электроэнергия переменного тока просто и экономно может быть преобразована с помощью трансформаторов из энергии низкого напряжения в энергию высокого напряжения и наоборот. Это свойство используют с целью уменьшения потерь электроэнергии при ее передаче по проводам на большие расстояния.

Величины, характеризующие переменный ток. Величины, которые полностью характеризуют переменный ток, т.е. дают полное представление о нем, называются параметрами переменного тока.

Амплитудным значением или просто амплитудой называется наибольшее значение переменного тока, которого он достигает в процессе изменений. Амплитудные значения силы тока, напряжения и ЭДС обозначаются соответственно I_M , U_M , E_M .

Мгновенным значением называется значение переменного тока в любой момент времени. Мгновенные значения силы тока обозначаются буквой i , напряжения — буквой u , ЭДС — буквой e .

Значение силы тока (напряжения, ЭДС), в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного значения, называется **действующим значением переменного тока**:

$$I = I_M / \sqrt{2}. \quad (1.10)$$

Действующие значения переменного тока, напряжения и ЭДС обозначаются соответственно I , U , E . Величина действующего значения переменного тока равна такой величине постоянного тока, который, проходя через одно и то же сопротивление в течение одного и того же времени, что и рассматриваемый нами переменный ток, выделяет одинаковое с ним количество тепла.

Ток, у которого мгновенные значения повторяются через определенный промежуток времени, называется периодическим.

Периодом T называется время, за которое происходит полное изменение переменного тока (рис. 1.3).

Частотой f называется число периодов в 1 с. Частота, равная одному периоду за 1 с, называется герцем.

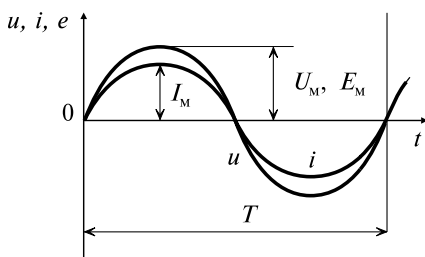


Рис. 1.3. Определение параметров переменного тока

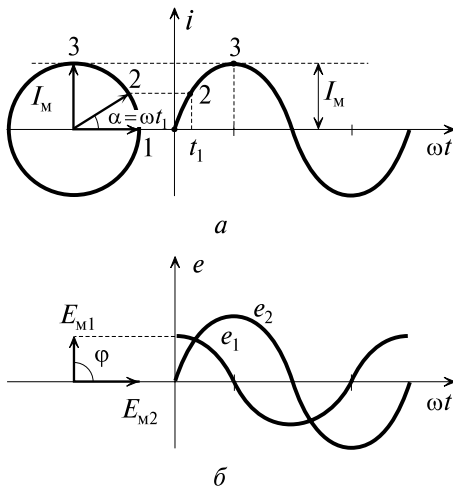


Рис. 1.4. Векторная и развернутая диаграммы ЭДС

Векторная и развернутая диаграммы. Фаза и сдвиг фаз. Графически переменный ток можно изобразить, используя прямоугольную систему координат (развернутая диаграмма, рис. 1.4, б), или с помощью векторов (векторная диаграмма, рис. 1.4, а). Развернутая диаграмма наглядно показывает, как изменяется переменный ток с течением времени. Векторная диаграмма позволяет рассматривать физические процессы, происходящие в цепях переменного тока, и с достаточной точностью производить графическое решение задач.

Вектор — это отрезок прямой, имеющий определенную длину и определенное направление. Длина вектора должна соответствовать амплитудному значению переменного тока. Пусть вектор I_M вращается с постоянной угловой частотой ω против часовой стрелки. Проекция вектора I_M на ось i определяется выражением $i = I_M \sin \omega t$ (см. рис. 1.4, а), которое соответствует мгновенному значению переменного тока.

Положение вектора определяется углом, который называется фазовым углом или просто фазой. Фаза равна нулю, если вектор расположен горизонтально и направлен вправо.

Угловая скорость вращения (ω) вектора называется круговой или угловой частотой. *Угловая частота* — это величина угла в радианах, который описывает вектор за 1 с:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (1.11)$$

Если две синусоидально изменяющиеся величины одновременно достигают нулевых и амплитудных значений, то они совпадают по фазе. Векторы таких величин в любой момент времени имеют одинаковое направление. Если векторы имеют неодинаковое направление, то говорят, что они сдвинуты по фазе на угол φ (см. рис. 1.4, б).

1.8. Сопротивления в цепях переменного тока

Цепь переменного тока с активным сопротивлением. Сопротивления в цепях переменного тока бывают активными и реактивными. Активные сопротивления расходуют энергию, реактивные — не расходуют.

Реактивными сопротивлениями, включенными в цепь переменного тока, являются сопротивления катушки индуктивности L и конденсатора C . Сопротивление катушки называется индуктивным сопротивлением (X_L), сопротивление конденсатора — емкостным (X_C).

На рис. 1.5 показана цепь переменного тока с активным сопротивлением и векторная диаграмма, из которой видно, что ток и напряжение совпадают по фазе. Они изменяются по одному и тому же закону, следовательно, можно записать:

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (1.12)$$

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (1.13)$$

Действующее значение силы тока в цепи с активным сопротивлением равно:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.14)$$

где U — действующее значение напряжения на сопротивлении; R — значение активного сопротивления.

Это выражение является выражением закона Ома для цепи с активным сопротивлением. Мощность, расходуемая в цепи на активном сопротивлении, равна:

$$P = IU \cos \varphi, \quad (1.15)$$

где φ — угол сдвига фаз между током и напряжением.

Так как ток и напряжение совпадают по фазе, то угол сдвига $\varphi = 0^\circ$, а $\cos \varphi = 1$. Мощность же в цепи равна произведению действующих значений тока и напряжения:

$$P = IU, \quad P = I^2 R. \quad (1.16)$$

Переменный ток в цепи с индуктивным сопротивлением.

Если катушку индуктивности, активное сопротивление которой равно нулю, подключить к источнику переменного тока (рис. 1.6), то в катушке потечет синусоидально изменяющийся переменный ток.

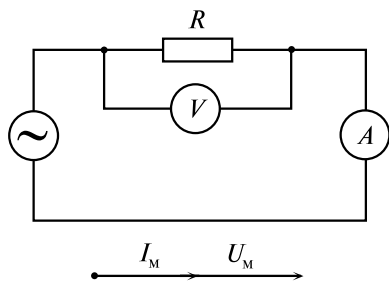


Рис. 1.5. Переменный ток в цепи с активным сопротивлением

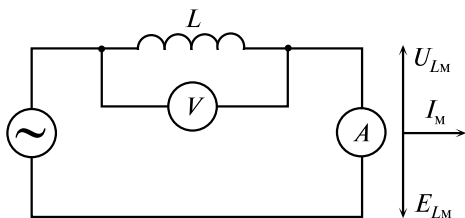


Рис. 1.6. Переменный ток в цепи с индуктивным сопротивлением

Согласно правилу Ленца индуцированная в катушке ЭДС противодействует изменениям силы тока. Это значит, что при увеличении силы тока в катушке ЭДС самоиндукции стремится создать ток, направленный навстречу вызывавшему ее току, а при уменьшении силы тока она, наоборот, стремится создать ток, совпадающий по направлению с ним.

Из векторной диаграммы видно, что ЭДС самоиндукции отстает по фазе от тока на 90° .

Напряжение на катушке или на источнике тока равно:

$$U_L = U = 2\pi fLI = \omega LI. \quad (1.17)$$

Произведение угловой скорости на индуктивность катушки (ωL) называется *индуктивным сопротивлением* X_L :

$$X_L = \omega L. \quad (1.18)$$

Энергия в катушке индуктивности не расходуется. В первую четверть периода она запасается в ее магнитном поле, а во вторую — отдается источнику тока. Произведение напряжения U_L на величину силы тока I в цепи называется *реактивной мощностью*.

В рассмотренной цепи активная мощность равна нулю, так как энергия в ней не расходуется, сдвиг по фазе между векторами тока I и напряжением U равен 90° и $\cos \varphi = 0$.

Переменный ток в цепи с последовательными активным и индуктивным сопротивлениями. Теперь рассмотрим цепь с реальной катушкой, которую можно представить как цепь с последовательно включенными индуктивностью L и активным сопротивлением R (рис. 1.7). Если в цепи с последовательными активным и индуктивным сопротивлениями протекает переменный синусоидальный ток, то напряжение на индуктивности, как было установлено ранее, опережает ток на 90° , а напряжение на активном сопротивлении совпадает с ним по фазе.

Так как напряжения U_L , U_R по фазе не совпадают, то напряжение, приложенное ко всей цепи, равно их геометрической сумме. Сложив векторы U_L и U_R , найдем величину вектора U , который сдвинут по фазе относительно вектора тока I на угол $\varphi < 90^\circ$, опережая его. Таким образом, в цепи переменного тока с последователь-

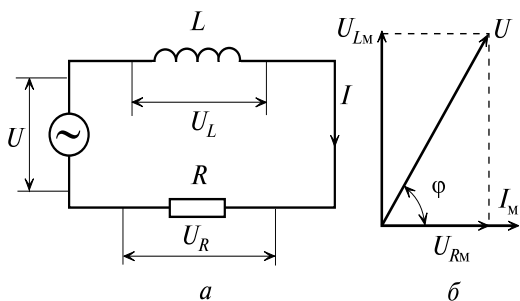


Рис. 1.7. Схема цепи с последовательными активным и индуктивным сопротивлениями (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

но соединенным активным сопротивлением и катушкой индуктивности ток отстает по фазе от напряжения.

Построив векторную диаграмму, рассмотрим треугольник со сторонами U_L , U_R , U . Этот треугольник называется *треугольником напряжений*. Так как он прямоугольный, то

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}. \quad (1.19)$$

Из треугольника напряжений можно получить подобный ему *треугольник сопротивлений* со сторонами R , X_L и Z . Из этого треугольника полное сопротивление цепи равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (1.20)$$

Так как сдвиг по фазе между током и напряжением меньше 90° , то энергия в такой цепи расходуется лишь на активном сопротивлении R .

Активная мощность при этом равна:

$$P = IU \cos \varphi. \quad (1.21)$$

Цепь переменного тока с емкостью. Если к источнику переменного тока подключить конденсатор, то в цепи появится ток. Способность конденсатора пропускать переменный ток объясняется тем, что под действием переменного синусоидального напряжения конденсатор периодически заряжается и разряжается, вследствие чего происходит перемещение электрических зарядов в проводниках, соединяющих конденсатор с источником тока. Соотношение фаз тока и напряжения представлено на рис. 1.8. *В цепи с емкостью ток опережает по фазе напряжение на 90°* . Закон Ома для цепи переменного тока с емкостью определяет действующее значение силы тока:

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (1.22)$$

Величина $X_C = \frac{1}{\omega C}$ называется емкостным сопротивлением. Она обратно пропорциональна частоте тока в цепи и емкости конденсатора. Измеряется в омах (Ом).

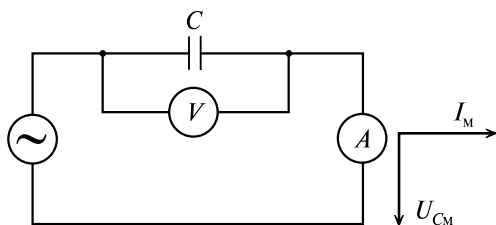


Рис. 1.8. Переменный ток в цепи с емкостью