

Министерство образования и науки РФ

Бурятский государственный университет

Дондоков Д.Д.

Электротехника

Учебное пособие

Улан-Удэ, 2007

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Электротехника» для студентов специальности «Технология и предпринимательство» государственного университета. В нем учтен многолетний опыт преподавания электротехники автором в Бурятском государственном педагогическом институте на физико-математическом и индустриально-педагогическом факультетах и инженерно-строительном факультете Восточно-Сибирского технологического института.

Курс делится на три части: первая посвящена основам теории цепей переменного тока; вторая - принципу действия и основным характеристикам трансформаторов, электрических машин постоянного и переменного тока, электроизмерительным приборам и электрическим измерениям; в третьей - в краткой форме изложены некоторые принципы применения устройств электротехнологий.

В этом учебном пособии “Электротехника” впервые введена глава “Электротехнология”.

Электротехнология - обширная область промышленного и сельскохозяйственного производства, в которой для достижения технологической цели того или иного процесса используется либо преобразование электрической энергии в тепловую, либо эффект переноса вещества электрическим током, либо “непосредственное” воздействие электрического тока, электрических или электромагнитных полей на объект технологической обработки.

## ВВЕДЕНИЕ

Электротехника есть наука о практическом использовании электрических и магнитных явлений. Также можно сказать, что электротехника есть наука о производстве, передаче, распределении, преобразовании и использовании электрической энергии.

Современная энергетика - это в основном электроэнергетика. Электрическая энергия применяется практически во всех областях человеческой деятельности. Интенсивное использование электрической энергии связано с ее следующими преимуществами: относительно простые методы преобразования в другие виды энергии, возможность передачи на далекие расстояния при малых потерях, легкая дробимость, простота управления электрическими установками и высокий КПД электротехнических устройств. Производственные установки в подавляющем большинстве работают от электропривода. Широко используются на практике электрические измерения.

Измерение неэлектрических величин электрическими методами дает возможность эффективно контролировать и управлять производственным процессом.

Автоматизация процессов производства в большинстве случаев выполняется на базе применения электрических аппаратов и их элементов.

Производство электрических машин, трансформаторов, аппаратов, реле и других электротехнических устройств представляет собой одну из наиболее крупных областей промышленности.

Одним из перспективных направлений практического применения электрической энергии является электротехнология с ее разделом электронно-ионная технология, которая обеспечивает прямое (без преобразования) использование энергии электрических полей в производственных процессах. Здесь электрическая энергия непосредственно участвует в обработке предмета труда: электросепарация, электросмешивание, электрические методы извлечения металлов из руд и т.д. Применение электрического метода осаждения дисперсных систем широко используется в электрофильтрах по очистке газа и воздуха от пыли, копоти; при аэрозольном методе обработки растений ядохимикатами; очистке воздушной среды и насыщении производственных помещений полезными для жизнедеятельности отрицательными аэроионами. Последнее имеет важное значение в использовании электричества в направлении экологии.

Началом развития науки об электрических явлениях считают 1600 г., когда Гильберт опубликовал результаты исследования электрических и магнитных явлений. В развитии науки об электричестве важное значение имеют исследования атмосферы электричества М.В. Ломоносова, Г.В. Рихмана и Б. Франклина.

Последующие этапы в развитии данной науки были связаны с созданием химического источника постоянного тока и исследованиями химического, магнитного, светового действий тока (А. Вольта, А.М. Ампер, В.В. Петров, Г.Х . Эрстед, Э.Х. Ленц ).

Создание электрических машин (генераторов, двигателей), трансформаторов и развитие практического применения электротехники стало возможным после открытия М. Фарадеем в 1831 г. закона электромагнитной индукции.

В 1870 г. З.Т. Грамм изобрел первый генератор постоянного тока с кольцевым якорем, который имел самовозбуждение. Использование постоянного тока ограничивало его передачу на расстояние и применение.

Система переменного тока была впервые применена П.Н. Яблочковым в 1876 г. для питания созданных им электрических свечей. При этом он использовал сконструированный им трансформатор с разомкнутой магнитной системой.

В дальнейшем трансформаторы выполнялись с замкнутой магнитной системой, изобретателями которых были О. Блати, М. Дери, К. Циперновский.

Большая заслуга в создании простых и надежных машин трехфазного тока принадлежит М.О. Доливо - Добровольскому.

Из достижений тех времен следует отметить изобретение Н.Г. Славяновым и Н.Н. Бенардосом электрической сварки. С этого времени начинается широкое внедрение электрической энергии в производственную деятельность человека: строятся электрические станции, появляется электрохимия, развивается электротяга, электроэнергия начинает применяться в быту.

В основе широкого развития электрификации в России был положен план ГОЭЛРО, который был принят в декабре 1920 года. Этот план предусматривал строительство в течение 10-15 лет 20 тепловых и 10 гидравлических районных электростанций общей мощностью 1,75 млн. кВт. План был выполнен к 1931 г.

Дальнейшее развитие электроэнергетики страны, за исключением военных лет 1941-1945 гг., шло нарастающим темпом. Основная доля выработки электрической энергии приходится на тепловые электрические станции. Дальнейшее развитие строительства атомных электрических станций требует серьезного повышения уровня надежности и безопасности их работы.

Однако мировые запасы органических топлив, урана и тория ограничены.

После осуществления управляемой термоядерной реакции топливом для будущих реакторов будут тяжелые изотопы водорода, содержащиеся в любой воде и легко можно их извлечь. Подсчитывают, что теплотворная способность 1 л воды, использованного в термоядерном

реакторе в качестве топлива, эквивалентна 300 литрам бензина. Решение проблемы управления термоядерной реакцией позволит человечеству использовать практически неисчерпаемые запасы энергии воды океанов, морей и рек.

Большую перспективу имеет использование так называемых возобновляемых источников энергии для выработки электрической энергии. К ним относятся экологически безопасные и фактически бесплатные энергии: приливов и отливов; энергии ветра и солнца; пара и горячей воды из глубинных недр земли.

По сравнению с обычными тепловыми электрическими станциями, ввиду отсутствия вращающихся частей, экономичным является магнитогидродинамический (МГД) генератор.

## Глава первая

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Электрической цепью называется система, состоящая из источников и приемников электрической энергии, соединенных между собой электропроводами, вдоль которых электрическая энергия передается от источников к приемникам.

Для включения или отключения приемников электрической энергии применяются устройства управления: рубильники, ключи, разного вида выключатели, магнитные пускатели и т.д. Таким образом, к элементам электрической цепи относятся: источники и приемники электрической энергии, электрические провода, устройства управления.

Электрическая цепь делится на две части. Источник питания образует внутреннюю часть цепи, а приемники с соединительными проводами и устройствами управления - внешнюю часть цепи. Известно, что, когда внешняя часть цепи образует с внутренней частью цепи замкнутый контур, в цепи возникает электрический ток. Прохождение электрического тока по цепи связано с преобразованиями энергии в источниках и приемниках электрической энергии.

В источниках питания переменного тока происходит преобразование механической энергии в электрическую, а в приемниках происходит обратное преобразование электрической энергии в другие виды энергии.

Ток, периодически меняющийся по величине и направлению, называется переменным. Обычно генераторы переменного тока проектируются на синусоидальное изменение тока. Расчет цепей переменного тока, изменяющегося по синусоидальному закону, значительно упрощается, так как производная синусоидальной функции есть функция подобная ей. Синусоидальная форма тока обеспечивает плавность его изменения, что исключает возможные перенапряжения в цепи и пробой изоляции проводов.

Внедрение в практику переменного тока объясняется еще рядом его преимуществ перед постоянным.

Переменный ток удобно передавать на длинные расстояния, благодаря возможности изменения его напряжения с помощью трансформатора. Генераторы и двигатели переменного тока просты по конструкции и надежны в работе.

При необходимости переменный ток легко можно преобразовать в постоянный.

## 1.2. ПОЛУЧЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

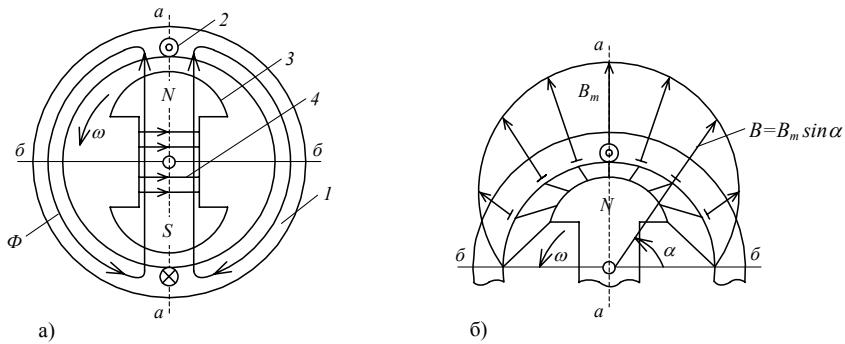


Рис. 1.1. Принципиальная схема простейшего генератора синусоидального тока (а) и график распределения магнитной индукции (б)

В линейных электрических цепях синусоидальный ток возникает под действием ЭДС такой же синусоидальной формы. Поэтому получение синусоидального тока следует рассматривать из принципа получения ЭДС.

Генератор переменного тока, в простейшем случае, можно представить (рис. 1.1,а) состоящим из неподвижного статора 1 с его обмоткой 2 и вращающегося ротора 3.

Ротор представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током, при его прохождении через обмотку 4. Магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый током возбуждения обмотки ротора, замыкается через стальной статор - магнитопровод.

С целью получения синусоидальной ЭДС магнитная система генератора выполняется так, что магнитная индукция  $B$  вдоль зазора между статором и магнитными полюсами распределяется по закону синуса (рис. 1.1,б).

При вращении ротора с постоянной угловой частотой  $\omega$  под проводником статорной обмотки магнитная индукция изменяется периодически по синусоидальному закону:

$$B = B_m \sin \alpha. \quad (1.1)$$

$B_m$  — максимальная магнитная индукция, когда ось ротора ( $a,a'$ ) составляет с осью витка статорной обмотки ( $\bar{a},\bar{a}'$ ) угол  $\alpha = 90^\circ$ , а наименьшее ее значение  $B = 0$  — при  $\alpha = 0^\circ$ .

Под влиянием переменной магнитной индукции в витке статорной обмотки наводится ЭДС, мгновенное значение которой определяется выражением:

$$e = Blu = B_m \sin \alpha l u, \quad (1.2)$$

где  $l$  - активная длина проводника обмотки статора, т.е. та его часть, которая пересекается магнитным потоком;  
 $u$  - линейная скорость, с которой линии магнитного потока пересекают статорную обмотку.

Учитывая, что величина ЭДС принимает свое максимальное значение

$$E_m = B_m l u,$$

получим:

$$e = E_m \sin \alpha . \quad (1.3)$$

Величина угла поворота ротора пропорциональна угловой частоте  $\omega$  и времени  $t$ , поэтому  $\alpha = \omega t$ . Тогда мгновенное значение ЭДС определится выражением:

$$e = E_m \sin \omega t. \quad (1.4)$$

Аргумент синусоидальной функции  $\omega t$  называется фазовым углом или фазой. Фаза  $\omega t$  выражается в градусах или в радианах. Ввиду пропорциональности величины фазы времени, фаза часто задается во времени  $t$ .

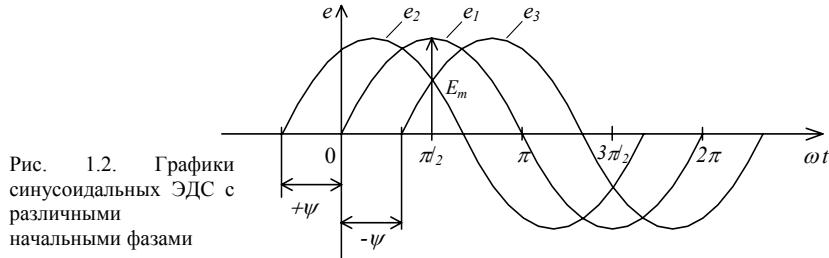
Значение фазы в начальный момент времени  $t = 0$  называется начальной фазой  $\psi$ . Знак начальной фазы можно определить направлением обхода от оси  $bb$  до оси  $aa$ . Если это направление обхода совпадает с направлением принятого положительного направления вращения ротора (против хода часовой стрелки), то начальная фаза считается положительной ( $+\psi$ ), а в случае противоположного направления обхода – начальная фаза считается отрицательной по своему знаку ( $-\psi$ ).

На графиках  $e = f(\omega t)$  или  $e = f(t)$  положительная фаза отсчитывается влево, а отрицательная – вправо от начала координат.

Если заданы уравнения синусоидальных ЭДС:

$$\begin{aligned} e_1 &= E_m \sin \omega t; \\ e_2 &= E_m \sin(\omega t + \psi); \\ e_3 &= E_m \sin(\omega t - \psi), \end{aligned}$$

то соответствующие им графики даны на рис. 1.2.



### 1.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Под влиянием синусоидальной ЭДС возникают ток и напряжение, изменяющиеся также по синусоидальному закону:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (1.5)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (1.6)$$

где  $i$  и  $u$  - соответственно мгновенные значения тока и напряжения, т.е. значения величин в рассматриваемый момент времени;

$\psi_i$  и  $\psi_u$  - начальные фазы тока и напряжения;

$I_m$  и  $U_m$  - амплитуды или максимальные значения тока и напряжения.

Графики переменного тока и напряжения сдвинутых по фазе даны на рис. 1.3.

В расчетах цепей переменного тока большое значение имеет разность фаз, называемая сдвигом фаз.

Сдвиг фаз между напряжением  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  и током  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  обозначается буквой  $\varphi$  и определяется как разность их начальных фаз:

$$\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i. \quad (1.7)$$

Фактически сдвиг фаз удобно определить при наличии графика путем сравнивания фаз, соответствующих ближайшим нулевым или одноименным амплитудным значениям синусоидальных величин.

Кроме амплитуды, фазы (начальной фазы, сдвига по фазе), мгновенного значения, рассмотренных выше, синусоидальные величины характеризуются периодом  $T$  и частотой  $f$ .

Периодом  $T$  называется время, за которое проходит полный цикл изменений периодической величины. Или период определяется временем, за которое происходит одно полное колебание синусоидальной величины, он измеряется в секундах.

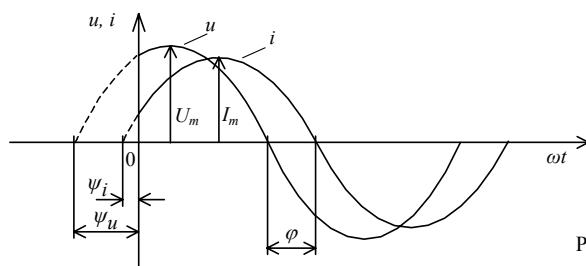


Рис. 1.3. Графики переменного тока и напряжения со сдвигом фаз

Число циклов в течение секунды (количество полных колебаний в секунду) определяет частоту изменения синусоидальной величины  $f$ . Частота определяется как величина, обратная периоду. Следовательно:

$$f = \frac{1}{T} \text{ или } T = \frac{1}{f}. \quad (1.8)$$

Частота измеряется в герцах (Гц) и имеет размерность  $\text{с}^{-1}$ . При частоте 50 Гц происходит 50 полных колебаний тока за одну секунду.

Стандартной частотой промышленного переменного тока у нас и в большинстве стран Европы является 50 Гц, а в США - 60 Гц.

Причины такого выбора предела частоты продиктованы рядом требований, в частности: понижение частоты неприемлемо, так как уже при частоте тока 40 Гц лампы накаливания заметно для глаза мигают; повышение частоты нежелательно, так как пропорционально частоте растет ЭДС самоиндукции, отрицательно влияющая на передачу электроэнергии по проводам и работу ряда электротехнических устройств.

Эти причины, однако, не ограничивают применение синусоидального тока при других частотах для решения различных технических и научных задач.

Например, при частотах 200-400 Гц снижаются вес и габариты электродвигателей, применяемых в авиации и устройствах автоматики.

В установках сквозного нагрева металлов для ковки и штамповки используют частоту от 500 до 10 000 Гц, в установках поверхностной закалки стали от 500 до 500 000 Гц. В радиотехнических устройствах применяют частоты от  $10^5$  до  $3 \cdot 10^{10}$  Гц.

Используются на практике синусоидальные токи и пониженной частоты. Частоту  $5 \div 10$  Гц применяют в металлургической промышленности. В некоторых странах для электротяги на железных дорогах применяют 25 и  $16 \frac{2}{3}$  Гц.

Можно найти связь между угловой  $\omega$  и линейной  $f$  частотами.

В течение времени  $t = T$ , равного периоду, ротор генератора делает один оборот, а фаза синусоидального тока изменяется на угол  $2\pi$  рад ( $360^\circ$ ).

Тогда угловая или циклическая частота синусоидального тока определяется выражением:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (1.9)$$

Она обычно измеряется в рад/с. Величина  $\omega$  применительно к генератору называется угловой скоростью вращения ротора или вала.

Для получения стандартной частоты  $f = 50$  Гц, в зависимости от частоты вращения вала  $n$  об/мин, генераторы переменного тока

выполняются с различным числом пар магнитных полюсов  $p$ . С учетом числа пар магнитных полюсов  $p$  определяется число циклов в минуту, которое равно  $pn$ . А число циклов в секунду определяет частоту переменного тока  $f$ . Следовательно, частота с учетом числа пар полюсов равна:

$$f = \frac{pn}{60}. \quad (1.10)$$

#### 1.4. ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный ток в течение периода принимает различные мгновенные значения. В таком случае вполне естественно возникает вопрос о том, как же оценивается величина переменного тока? Ведь амперметр в цепи переменного тока показывает какое-то определенное значение, а среднее значение тока за период не может служить для оценки величины тока, ибо оно равно нулю.

Величина переменного тока обычно определяется в сравнении его с постоянным током, при условии эквивалентности их тепловых действий.

Значение переменного тока, принятого на основе сопоставления его с постоянным током, по условиям эквивалентности их тепловых действий называется действующим значением переменного тока.

Таким образом, действующее значение переменного тока равняется такому значению постоянного тока, которое за время одного периода выделяет при данном сопротивлении такое же количество тепла, что и переменный ток за это же время.

На основе закона Джоуля-Ленца выразим количество тепла, выделяемое постоянным током величиной  $I$  при его прохождении через элемент с сопротивлением  $r$  за время, равное периоду переменного тока  $T$ :

$$Q = rI^2T. \quad (1.11)$$

Такое же количество тепла в данном элементе с сопротивлением  $r$  за это же время может выделить и переменный ток. Это количество тепла можно выразить:

$$Q = \int_0^T ri^2 dt. \quad (1.12)$$

На основании условия равенства количества теплоты имеем:

$$rI^2T = \int_0^T ri^2 dt,$$

$$\begin{aligned}
I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m \sin \omega t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \\
&= I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.
\end{aligned}$$

Действующее значение переменного тока  $I$  меньше его максимального значения  $I_m$  в  $\sqrt{2}$  раз, т.е.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ или } I = 0,707 I_m \quad (1.13)$$

Аналогична зависимость между действующим и максимальным (амплитудным) значениями для напряжения  $U$  и ЭДС  $E$ :

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ или } E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (1.14)$$

В большинстве электроизмерительных приборов, определяющих ток и напряжение, используется принцип теплового или электродинамического эффекта. Поэтому их показания соответствуют действующим значениям измеряемых величин.

### 1.5. СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При анализе, расчете электрических цепей несинусоидального тока и изучении выпрямительных устройств пользуются средним значением синусоидальных величин. Если среднее значение синусоидальной величины за период равно нулю, то это значение определяется за время равное половине периода.

Тогда имеем:

$$\begin{aligned}
I_{cp} &= \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{T} \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = \\
&= \frac{2I_m}{\omega T} \left( -\cos \omega t \right) \Big|_0^{T/2}, \text{ с учетом } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ получим} \\
&= \frac{I_m T}{\pi T} \left[ -\cos \frac{2\pi}{T} \frac{T}{2} - (-1) \right] = \frac{2I_m}{\pi} = 0,637 I_m. \quad (1.15)
\end{aligned}$$

По этой формуле аналогично выражается среднее значение напряжения и ЭДС:

$$U_{cp} = 0,637U_m \text{ или } E_{cp} = 0,637E_m. \quad (1.16)$$

#### 1.6. ВЕКТОРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

При анализе цепей переменного тока математические расчеты усложняются, становятся весьма громоздкими, если электрические величины будут представлены в форме синусоидальных функций.

Наглядность при анализе, упрощение при расчете дает использование векторных диаграмм.

Известно, что синусоидальная величина изображается вращающимся вектором. Длина вектора в определенном масштабе должна определять амплитуду или действующее значение величины; угловая скорость вращения вектора - угловую или циклическую частоту тока; проекция вектора на вертикальную ось - мгновенное значение; угол, образованный вектором и осью абсцисс в начальный момент - начальную фазу.

Токи

$$i_1 = I_{m_1} \sin \omega t \text{ и } i_2 = I_{m_2} \sin(\omega t + \psi_2) \quad (1.17)$$

на рис. 1.4 изображены в виде вращающихся векторов. Длина каждого вектора в масштабе определена величиной амплитуды соответствующего тока  $I_{m_1}$  и  $I_{m_2}$ . Вектора направлены относительно линии отсчета  $oo$  (горизонтального диаметра) под углом  $\psi_1 = 0$  и  $\psi_2$ , соответствующих начальным фазам токов. Эти положения векторов соответствуют моменту времени

$t = 0$ . При вращении векторов в положительном направлении (против хода часовой стрелки) с угловой частотой  $\omega$ , проекции их на вертикальную ось будут выражать, для соответствующих моментов времени, мгновенные

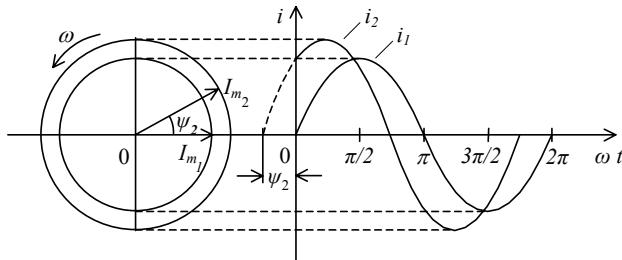


Рис. 1.4. Изображение синусоидальных токов вращающимися векторами

значения токов  $i_1$  и  $i_2$ .

От вращающегося вектора тока можно перейти к синусоиде тока, если построить зависимость мгновенных значений тока от фазового угла  $\omega t$  или от времени  $t$ .

На оси абсцисс обозначают фазовый угол  $\omega t$  в соответствии с делениями окружности в радианах или в градусах, описанными вращающимися векторами. Эти деления можно, как было отмечено, выражать и в частях периода.

Определенному углу  $\omega t$ , для момента времени  $t$ , соответствует мгновенное значение тока  $i$ . По этим координатным точкам можно получить синусоиды токов.

Таким образом, синусоидальные токи (напряжения, ЭДС) можно изображать с помощью вращающихся векторов.

### 1.7. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Совокупность векторов, изображающих синусоидальные величины одинаковой частоты в начальный момент времени, называется векторной диаграммой.

Рассмотрим пример сложения двух синусоидальных токов (1.17), описанных выше.

Вектора амплитуд токов  $I_{m_1}$  и  $I_{m_2}$  представим, как на рис. 1.4 в начальный момент времени с углом между ними  $\psi = \psi_2 - \psi_1$ , равному ( $\psi_1 = 0$  для данного примера) сдвигу фаз.

Для получения вектора амплитуды суммарного тока  $I_m$  необходимо произвести геометрическое сложение этих токов по правилу параллелограмма (рис. 1.5, а).

Суммарный ток определяется умножением длины диагонали  $l$  на масштаб тока  $m_I$  т.е.

$$I_m = l m_I.$$

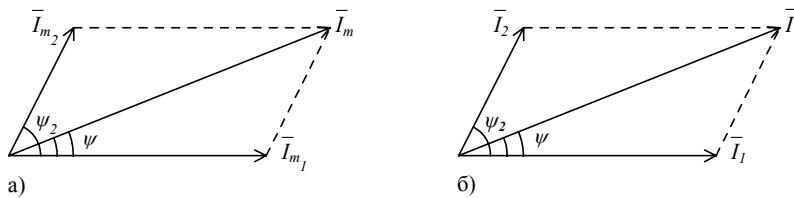


Рис. 1.5. Векторная диаграмма сложения синусоидальных токов для максимальных (а) и действующих (б) значений

Разумеется, подобное сложение можно выполнить не только для амплитудных значений, но и для действующих значений синусоидальных величин (рис. 1.5,б).

Учитывая возможность параллельного переноса векторов, можно упростить построение диаграммы и сложение векторов. Если перенесем вектор  $I_2$  так, чтобы начало его было совмещено с концом вектора  $I_1$ , то вектор, соединяющий начало первого ( $I_1$ ) и конец второго ( $I_2$ ) вектора, будет суммарным вектором  $I$  (рис. 1.6). Такую векторную диаграмму называют топографической.

Топографическая векторная диаграмма по сравнению с обычной удобна в сложении нескольких векторов.

Например, сложение трех векторов синусоидальных напряжений  $U_1, U_2, U_3$  показано на рис. 1.7.

Если требуется произвести вычитание синусоидальных величин, то надо рассматривать это как операцию сложения, но при противоположном знаке одного из слагаемых, являющегося вычитаемым, т.е.

$$\bar{U} = \bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \bar{U}_1 + (-\bar{U}_2).$$

На диаграмме вектор  $U_2$  переносится параллельно, но с изменением направления на противоположное, тогда замыкающий вектор  $U$  будет выражать разность между синусоидальными напряжениями  $U_1$  и  $U_2$  (рис. 1.8).

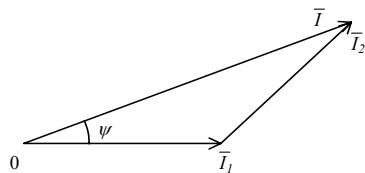


Рис. 1.6. Топографическая векторная диаграмма сложения синусоидальных токов



Рис. 1.7. Топографическая векторная диаграмма сложения трех синусоидальных напряжений

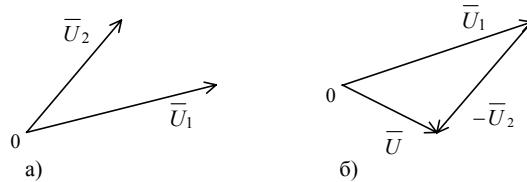


Рис. 1.8. Вектора напряжений (а) и топографическая диаграмма при их вычитании (б)

### 1.8. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

По количеству фаз электрические цепи синусоидального тока делятся на однофазные и трехфазные.

По типу элементов, включенных в цепь, электрические цепи синусоидального тока могут быть линейными и нелинейными. Вольт-амперная характеристика цепи  $I = f(U)$ , содержащей линейный элемент, изображается прямой линией. Такая цепь называется линейной.

Нелинейные электрические цепи содержат нелинейные элементы, и вольт-амперная характеристика таких отлична от прямой. Примером нелинейных элементов могут быть вентили, электронные лампы, термосопротивления и т.д.

При строгом подходе сопротивления всех элементов в той или иной мере зависят от температуры.

Например, спирали нагревательных приборов, их сопротивления увеличиваются пока температура не достигнет своего стабильного значения.

По характеру сопротивлений цепи могут быть с активными и реактивными сопротивлениями. А реактивные сопротивления в свою очередь делятся на индуктивные и емкостные.

### 1.9. ЦЕПЬ С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Сопротивление одного и того же элемента в зависимости от включения его в цепь постоянного или переменного тока бывает по величине разным. В цепи постоянного тока величина сопротивления определяется, как известно, удельным сопротивлением материала, длиной и сечением проводящего элемента.

А в цепи переменного тока проводящее сечение элемента как бы уменьшается из-за проявления поверхностного эффекта (эффект

вытеснения тока к поверхности элемента), что приводит к увеличению сопротивления по сравнению с сопротивлением в цепи постоянного тока.

Сопротивление элемента к переменному току называется активным сопротивлением. О величине активного сопротивления можно судить еще и с точки зрения энергетических процессов в цепи. Активное сопротивление потребителей электрической энергии обычно пропорционально мощности необратимого превращения электрической энергии в тепловую в нагревательных элементах, в механическую - в электродвигателях. Таким образом, это сопротивление связано с полезным превращением электроэнергии, обеспечивает активный процесс, что оправдывает его название.

Рассмотрим цепь синусоидального тока с активным сопротивлением  $r$  (рис 1.9), к которому приложено синусоидальное напряжение:

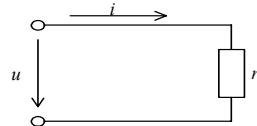


Рис. 1.9. Электрическая цепь с активным сопротивлением

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (1.18)$$

Необходимо определить величину и характер изменения тока в цепи.

Закон Ома для мгновенного значения тока и напряжения имеет вид:

$$i = \frac{u}{r}. \quad (1.19)$$

Используя заданное выражение (1.18), получим :

$$i = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t. \quad (1.20)$$

Полученное выражение позволяет заключить, что ток в цепи с активным сопротивлением меняется также по синусоидальному закону, как и напряжение, приложенное на вход цепи с активным сопротивлением  $r$ .

Важно обратить внимание на то, что ток и напряжение по фазе совпадают, фазовые углы в выражениях тока и напряжения одинаковы и равны  $\omega t$ , т.е. нет между ними сдвига по фазе,  $\varphi = 0$ .

Исходя из этого, можно сделать вывод: в цепи с активным сопротивлением напряжение и ток одинаковы по характеру изменений и они совпадают по фазе.

Этот вывод можно продемонстрировать с помощью графиков мгновенных значений напряжения и тока (рис. 1.10,а) и векторной диаграммы (рис. 1.10,б).

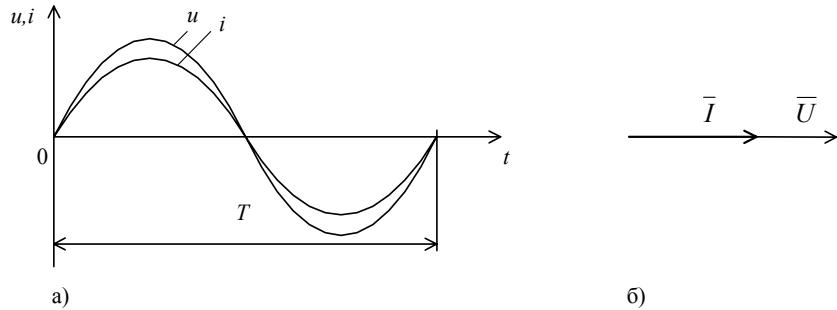


Рис. 1.10. Графики мгновенных значений напряжения и тока (а), векторная диаграмма цепи с активным сопротивлением  $r$  (б)

В формуле (1.20) имеем:

$$I_m = \frac{U_m}{r}, \quad (1.21)$$

что является законом Ома для максимальных значений тока и напряжения.

Разделив обе части этого равенства на  $\sqrt{2}$ , можно получить закон Ома для действующих значений:

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

Эти формулы могут служить для расчета неизвестных значений параметров цепи.

## 1.10. ЦЕПЬ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ

### 1.10.1 Идеальная катушка.

#### Ток, напряжение, индуктивное сопротивление

Индуктивностью  $L$  обладают все проводники в большей или меньшей мере, в зависимости от длины и взаимного расположения частей. Значительной индуктивностью обладают катушки, имеющие большое количество витков. Катушка обычно выполняется из медного провода, поэтому ее активное сопротивление бывает пренебрежимо малым по величине. Катушку, активным сопротивлением которой пренебрегают и считают равным нулю, называют идеальной катушкой.

Рассмотрим идеальную катушку ( $r = 0$ ) с индуктивностью  $L$  (рис. 1.11), по которой проходит синусоидальный ток:

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1.23)$$

При заданном токе необходимо определить величину и характер приложенного к катушке напряжения  $u$ . Протекающий по катушке ток  $i$ , являясь переменным, должен создавать и переменный же магнитный поток, а последний в катушке возбуждает ЭДС самоиндукции  $e$ , выражаемую следующей формулой:

$$e = -L \frac{di}{dt}. \quad (1.24)$$

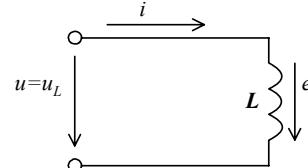


Рис. 1.11. Электрическая цепь с индуктивностью  $L$

Знак минус, согласно правилу Ленца, указывает на то, что ЭДС самоиндукции  $e$  всегда имеет такое направление, при котором она препятствует изменению магнитного потока или тока в цепи.

С учетом того, что напряжение на входе цепи полностью приложено к катушке и, согласно второму закону Кирхгофа, имеем:

$$u = u_L = -e. \quad (1.25)$$

Т.е. приложенное к идеальной катушке напряжение  $u$  уравновешивает (компенсирует) ЭДС самоиндукции  $e$ . Это напряжение можно назвать индуктивным напряжением  $u_L$ .

С учетом выражений (1.23), (1.24) и (1.25) имеем:

$$\begin{aligned} u_L &= -e = L \frac{di}{dt} = L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = \\ &= \omega L I_m \cos \omega t = U_{L_m} \cos \omega t = U_{L_m} \sin(\omega t + 90^\circ), \end{aligned} \quad (1.26)$$

где  $U_{L_m} = \omega L I_m$  - амплитуда индуктивного напряжения. (1.27)

Полученное выражение (1.26) позволяет сделать заключение: индуктивное напряжение так же, как и протекающий по катушке ток, имеет синусоидальный характер, и он опережает ток по фазе на угол  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ) или на четверть периода  $T/4$ .

Угол сдвига  $\varphi$  на векторной диаграмме обычно показывают направленной дугой от вектора тока к вектору напряжения. Если направление дуги совпадает с положительным направлением вращения векторов, то угол сдвига считают положительным, а в противном случае — отрицательным.

На рис. 1.12 даны, соответственно, графики мгновенных значений напряжения и тока, векторная диаграмма цепи с индуктивностью.

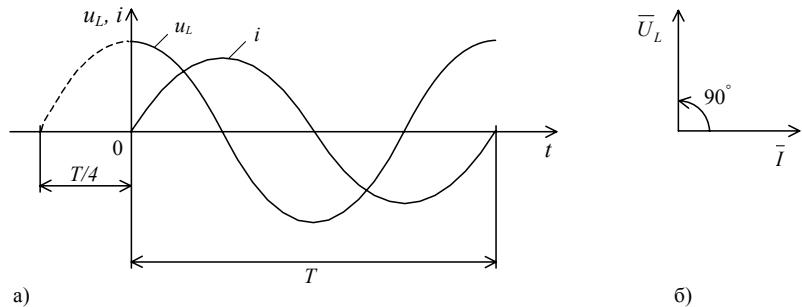


Рис. 1.12. Графики мгновенных значений напряжения (а) и векторная диаграмма электрической цепи с индуктивностью (б)

Формулу для расчета индуктивного напряжения  $U_L$  можно получить из выражения амплитуды индуктивного напряжения (1.27), если обе части этого выражения разделить на  $\sqrt{2}$  :

$$U_L = \omega L I. \quad (1.28)$$

Отсюда следует:

$$I = \frac{U_L}{\omega L}, \quad (1.29)$$

где величина  $\omega L$  имеет размерность сопротивления:

$$[\omega L] = \frac{I}{c} \text{ ГН} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{с}}{\text{с}} = \text{Ом}.$$

Эту величину обозначают буквой  $X_L$  и называют индуктивным сопротивлением:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L. \quad (1.30)$$

Как видно, индуктивное сопротивление пропорционально частоте переменного тока  $f$  и величине индуктивности катушки  $L$ . Следовательно, при постоянном токе ( $f = 0$ ) оно равно нулю. Поэтому многие аппараты и машины переменного тока нельзя включать на постоянное напряжение, так как при переменном токе они обладают значительным индуктивным сопротивлением, а для постоянного тока их сопротивление относительно мало, и величина постоянного тока может достигать опасных значений.

Индуктивное сопротивление является реактивным по характеру, что означает отсутствие необратимого превращения электрической энергии

и, следовательно, реального потребления энергии в цепи с таким сопротивлением.

По существу это условное сопротивление, посредством которого учитывается противодействие ЭДС самоиндукции изменениям величины переменного тока.

Влияние индуктивности проводников вызывает неравномерное распределение переменного тока по сечению проводника, выражаящегося в форме поверхностного эффекта.

Поверхностный эффект заключается в том, что плотность переменного тока является наибольшей у поверхности проводника, а по мере удаления от поверхности к центру сечения она убывает. Такое неравномерное распределение тока вызывается различием величины индуктивности внешних и внутренних слоев проводника.

Представим проводник в виде круглого сечения (рис. 1.13), по которому протекает переменный ток повышенной частоты. Переменный ток вызывает появление переменного магнитного потока, силовые линии которого показаны на рис. 1.13 в виде концентрических окружностей, показанных пунктирными линиями. Проводящее сечение можно представить в виде отдельных проводящих нитей, на рисунке отмечены они в центре и затем в радиальном направлении. Видно, что потокосцепление  $\Psi$ , определяемое количеством сцепленных магнитных силовых линий для проводящих нитей, разное. Потокосцепление к центру сечения увеличивается, достигается максимума в центральной точке.

Известно, что индуктивность  $L$  контура увеличивается пропорционально потокосцеплению  $\Psi$  при неизменном действующем значении переменного тока  $I$ :

$$L = \frac{\Psi}{I}, \quad (1.31)$$

где потокосцепление  $\Psi = W\Phi$  определяется произведением числа витков катушки  $W$  со сцепленным этими витками магнитным потоком  $\Phi$ .

Следовательно, индуктивность  $L$  имеет наибольшее значение в



Рис. 1.13. К объяснению поверхностного эффекта

центре сечения и уменьшается она к поверхности проводника. Поэтому и величина индуктивного сопротивления (1.30) имеет наибольшее значение в середине проводящего сечения, а к поверхности уменьшается.

Плотность тока будет наибольшей в тех частях сечения, где сопротивление относительно меньше, т.е. проявляется эффект «вытеснения» тока к поверхности проводника. Такой поверхностный эффект проявляется тем сильнее, чем больше частота переменного тока  $f$ .

Любой проводник тока в зависимости от материала обладает активным сопротивлением. Оно в отличие от индуктивного сопротивления распределено по сечению равномерно. Проводящий материал, имеющий активное сопротивление под действием тока нагревается, причем сильнее там, где плотность тока больше, т.е. на поверхности.

Рассмотренный эффект в принципе можно использовать для поверхностной закалки. Поверхностная закалка применяется для деталей, требующих твердой износостойчивости поверхности, и вязкой, упругой сердцевины.

### 1.10.2. Реальная катушка. Треугольники напряжений и сопротивлений, полное сопротивление

Любая катушка индуктивности обладает некоторым активным сопротивлением  $r$ . Катушку с учетом ее активного сопротивления  $r$  называют обычно реальной катушкой, в отличие от идеальной, где пренебрегают этим сопротивлением, принимая его равным нулю.

Схему замещения реальной катушки можно изобразить как последовательное соединение элементов  $r$  и  $L$  (рис. 1.14).

Пусть по реальной катушке проходит синусоидальный ток:

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

Необходимо выяснить характер изменения напряжения на зажимах цепи и сдвиг его по фазе относительно тока.

Согласно второму закону Кирхгофа для мгновенных напряжений, можно записать:

$$u = u_r + u_L, \quad (1.32)$$

где  $u_r$  - активная составляющая напряжения (можно обозначить через  $u_a$ );

$u_L$  - реактивная (индуктивная) составляющая напряжения.

Выражая активную составляющую напряжения через сопротивление и ток, находим:

$$u_r = r i = r I_m \sin \omega t = U_{r m} \sin \omega t, \quad (1.33)$$

где  $U_{r m} = r I_m$  - амплитуда активного напряжения. В действующих значениях тока и напряжения она выражается:

$$U_r = r I. \quad (1.34)$$

Учитывая изложенное в предыдущем параграфе и подставляя выражения (1.33) и (1.26) в формулу (1.32), получим:

$$u = U_{r m} \sin \omega t + U_{L m} \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (1.35)$$

Согласно полученному выражению можно показать графики изменения напряжений и тока (рис. 1.15).

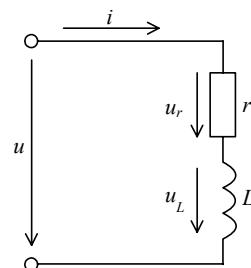


Рис. 1.14. Электрическая схема реальной катушки индуктивности (последовательное соединение  $r$  и  $L$ )

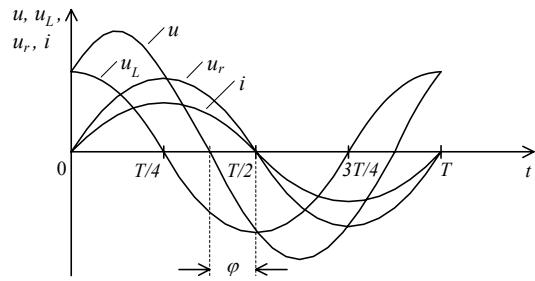


Рис. 1.15. Графики изменения напряжений и тока

При прохождении синусоидального тока через реальную катушку или через цепь с активно-индуктивным сопротивлением результирующее напряжение  $u$  изменяется также по синусоидальному закону, как и ток  $i$ . Притом, это напряжение  $u$  опережает ток  $i$ , как видно из графика, на угол  $\varphi$  и можно его представить в виде:

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.36)$$

При построении векторной диаграммы следует определить один из векторов как исходный, и начать построение диаграммы с этого вектора, а остальные - ориентировать относительно него, согласно полученным значениям сдвигов фаз.

Известно, что при последовательном соединении элементов ток, проходящий через эти элементы, является общим, поэтому построение векторной диаграммы при таком способе соединения удобно начать с вектора тока, и относительно него ориентировать напряжения на отдельных участках (элементах).

Согласно полученному выражению (1.35) построена векторная диаграмма (рис. 1.16).

Построенная топографическая векторная диаграмма (треугольник напряжений) представляет собой прямоугольный треугольник, стороны которого в принятом масштабе определяют величины напряжений: катет прилежащий к углу  $\varphi$  - активное напряжение  $U_r$ , противолежащий - индуктивное напряжение  $U_L$ , а гипотенуза - полное или общее, напряжение цепи  $U$ . Из диаграммы следует, что вектор общего напряжения определяется геометрической суммой векторов  $U_r$  и  $U_L$ :

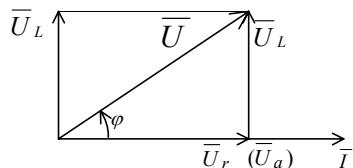


Рис. 1.16. Векторная диаграмма цепи при последовательном соединении элементов  $r$  и  $L$  (треугольник напряжений)

$$\bar{U} = \bar{U}_r + \bar{U}_L. \quad (1.37)$$

Из треугольника напряжений можно получить следующие расчетные формулы в виде тригонометрических соотношений:

$$U_r = U \cos \varphi, \quad U_L = U \sin \varphi, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_r} \quad \text{и т.д.} \quad (1.38)$$

Величину полного напряжения можно выразить в виде:

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_L^2}. \quad (1.39)$$

А угол сдвига по фазе выражается как:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{U_L}{U_r} \right).$$

При делении сторон треугольника напряжений на ток  $I$  получим треугольник сопротивлений, подобный треугольнику напряжений (рис. 1.17)

$$\frac{U_r}{I} = r, \quad \frac{U_L}{I} = x_L = \omega L, \quad \frac{U}{I} = Z. \quad (1.40)$$

Гипотенуза треугольника определяет полное сопротивление цепи, и оно выражается как:

$$Z = \sqrt{r^2 + x_L^2}. \quad (1.41)$$

Из треугольника сопротивлений можно получить соотношения, аналогичные для треугольника напряжений:

$$r = Z \cos \varphi, \quad x_L = Z \sin \varphi, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{r}, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_L}{r} \right) \quad (1.42)$$

Следует обратить внимание, что рассмотренные треугольники дают наглядное представление о зависимости величины угла  $\varphi$  от соотношения реактивных и активных составляющих напряжений и сопротивлений. При отсутствии реактивных составляющих ( $U_L = 0, x_L = 0$ ) угол  $\varphi = 0$ , а при отсутствии активных составляющих ( $U_r = 0, r = 0$ ) угол  $\varphi = 90^\circ$ . Таким образом, угол сдвига  $\varphi$  изменяется, в зависимости от соотношения активного и реактивного составляющих нагрузки, в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

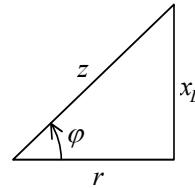


Рис. 1.17. Треугольник сопротивлений

### 1.11. ЦЕПЬ С ЕМКОСТЬЮ

Элементом цепи, обладающим значительной емкостью, является конденсатор. Конструктивно простейший конденсатор представляет собой две пластины из проводящего материала, разделенные между собой слоем диэлектрика.

В цепи постоянного тока конденсатор создает разрыв цепи, ток, естественно, не протекает. А в цепи переменного тока, приложенное к обкладкам конденсатора напряжение периодически меняется, и тем самым обеспечивает периодическое изменение заряда на обкладках по величине и полярности. Такое изменение заряда и связанное с ним движение электронов и есть электрический ток, он создает заряд и разряд конденсатора.

Пусть к обмоткам конденсатора емкостью  $C$  (рис. 1.18) приложено синусоидальное напряжение:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Требуется определить характер возникающего в цепи тока  $i$  и сдвиг по фазе его относительно заданного напряжения.

Величина тока определяется изменением заряда  $q$  на обкладках конденсатора:

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (1.43)$$

А заряд на конденсаторе определяется как

$$q = C u_c, \quad (1.44)$$

где  $u_c$  - напряжение на конденсаторе (в данном случае  $u_c = u$ ).

Ток  $i$  с учетом выражения (1.44) можно представить:

$$\begin{aligned} i &= C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = \\ &= \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ). \end{aligned} \quad (1.45)$$

Таким образом, ток в цепи с емкостью изменяется, как и приложенное к конденсатору напряжение по синусоидальному закону, притом он опережает напряжение по фазе на угол  $90^\circ$  или по времени, на четверть периода  $T/4$ .

Графики тока, напряжения и их векторная диаграмма даны на рис. 1.19(а) и (б).

Из выражения (1.45) следует:

$$I_m = \omega C U_m, \quad (1.46)$$

или для действующих значений

$$I = \omega C U. \quad (1.47)$$

Если представить полученную формулу в традиционной форме закона Ома, то получим:

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}, \quad (1.48)$$

где выражение  $\frac{1}{\omega C}$  имеет размерность сопротивления и называется емкостным сопротивлением. Это сопротивление, как и индуктивное, носит реактивный характер и обозначается:

$$x_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (1.49)$$

Размерность последнего:

$$\left[ \frac{1}{\omega C} \right] = \frac{1}{\frac{1}{c} \Phi} = \frac{c \cdot B}{K_l} = \frac{c \cdot B}{A \cdot c} = \frac{B}{A} = O_m.$$

На векторной диаграмме (рис. 1.19,б) угол сдвига  $\varphi$  указан в направлении, противоположном относительно принятого положительного направления вращения векторов. Поэтому угол сдвига в случае емкости принимают со знаком минус, т.е.  $\varphi = -90^\circ$ , а это означает, что напряжение отстает от тока по фазе на данный угол.

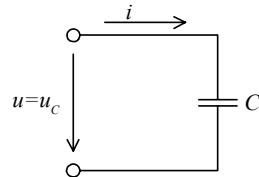


Рис. 1.18. Цепь с емкостью

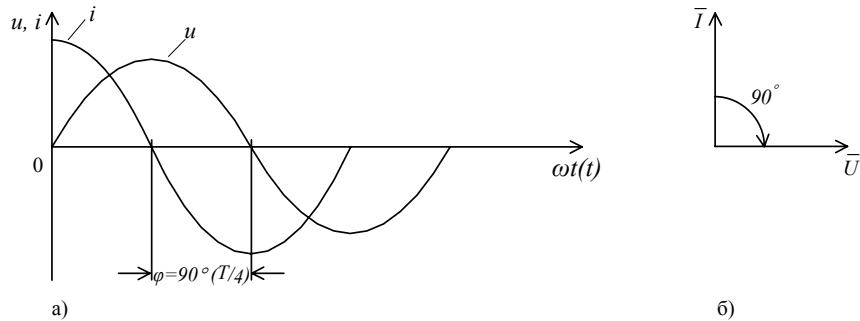


Рис. 1.19. Графики напряжения и тока (а)  
и векторная диаграмма (б) цепи с емкостью

### 1.12. ЦЕЛЬ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ АКТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ

Рассмотрим цепь при последовательном соединении элементов  $r$ ,  $L$  и  $C$  (рис. 1.20).

Пусть на входе этой цепи приложено синусоидальное напряжение:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Под действием этого напряжения в цепи должен возникать синусоидальный ток  $i$ , который протекает без изменения через все последовательно соединенные элементы  $r$ ,  $L$ ,  $C$ , и создает падение напряжения на каждом из них, соответственно, равные:

$$u_r = U_{mr} \sin \omega t, \quad u_L = U_{mL} \sin(\omega t + 90^\circ), \quad u_C = U_{mC} \sin(\omega t - 90^\circ).$$

По второму закону Кирхгофа для данной цепи можно записать уравнение в мгновенных значениях напряжений:

$$u = u_r + u_L + u_C. \quad (1.50)$$

Их действующие значения соответственно равны:

$$U_r = rI, \quad U_L = \omega LI, \quad U_C = \frac{1}{\omega C} I. \quad (1.51)$$

Второй закон Кирхгофа можно представить в векторной форме:

$$\bar{U} = \bar{U}_r + \bar{U}_L + \bar{U}_C. \quad (1.52)$$

Учитывая сдвиги по фазе между вектором тока  $I$  и векторами напряжений  $U_r$ ,  $U_L$ ,  $U_C$ , можно построить топографическую векторную диаграмму в виде треугольника напряжений (рис. 1.21).

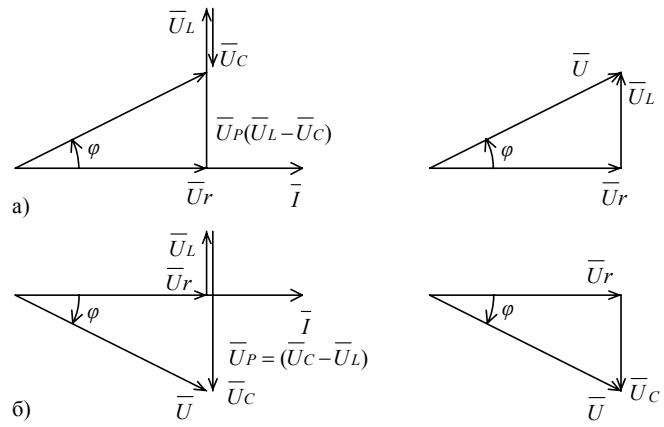


Рис. 1.21. Векторные диаграммы цепи при последовательном соединении элементов  $r, L, C$  (треугольники напряжений)

В треугольнике напряжений катет, противолежащий углу  $\varphi$ , выражает реактивное напряжение  $U_p$ . Он определяется как геометрическая сумма индуктивного  $U_L$  и емкостного  $U_C$  напряжений. Ввиду того, что вектора индуктивного и емкостного напряжений направлены в противоположные стороны, величину реактивного напряжения можно определить как алгебраическую сумму индуктивного и емкостного напряжений. При этом характер реактивного напряжения определяется характером того напряжения, которое имеет большее численное значение.

Знак угла  $\varphi$  зависит от соотношения индуктивных и емкостных величин. Если  $U_L > U_C$  ( $x_L > x_C$ ), то угол  $\varphi$  положителен, а реактивное напряжение  $U_p$  носит индуктивный характер (рис. 1.21, а).

При  $U_L < U_C$  ( $x_L < x_C$ ) угол  $\varphi$  имеет отрицательный знак, а реактивное напряжение имеет емкостной характер (рис. 1.21, б).

При расчетах обычно индуктивные величины (напряжение, сопротивление) берутся со знаком плюс, а емкостные - со знаком минус.

Тогда реактивное напряжение выражается:

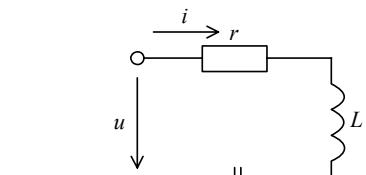


Рис. 1.20. Цепь при последовательном соединении элементов  $r, L, C$

$$U_p = U_L - U_C = \omega L I - \frac{1}{\omega C} I = (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I = x I. \quad (1.53)$$

В этом выражении величина  $x$  называется реактивным сопротивлением цепи, это сопротивление, как видно, равно разности индуктивного и емкостного сопротивлений:

$$x = \omega L - \frac{1}{\omega C} = x_L - x_C. \quad (1.54)$$

Из треугольника напряжений, как нам известно, легко получить треугольник сопротивлений (рис. 1.22).

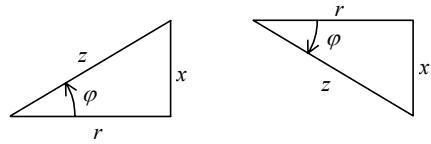


Рис. 1.22. Треугольники сопротивлений

Гипотенуза треугольника выражает полное сопротивление  $Z$ , величина его равна:

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (1.55)$$

Закон Ома электрической цепи переменного тока, содержащей элементы  $r, L, C$ , имеет вид:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \quad (1.56)$$

Из треугольника сопротивлений, как известно, можно получить расчетные формулы:

$$r = Z \cos \varphi, \quad x = Z \sin \varphi, \quad x = r \operatorname{tg} \varphi \quad \text{и}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{x}{r} = \operatorname{arctg} \frac{x_L - x_C}{r}. \quad (1.57)$$

Таким образом, значение угла  $\varphi$  зависит от соотношения между реактивным  $x$  и активным  $r$  сопротивлениями. Чем больше реактивное сопротивление  $x$ , тем больше угол  $\varphi$ . Если реактивное сопротивление  $x = x_L - x_C = 0$ , то угол  $\varphi = 0$ , т.е. ток и напряжение по фазе совпадают.

### 1.13. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Для изучения резонанса напряжений задана цепь из последовательно соединенных катушки индуктивности, конденсатора переменной емкости и активного сопротивления, т.е. цепь при последовательном соединении элементов  $r, L, C$  (рис. 1.23).

Пусть на вход этой цепи подведено напряжение с угловой частотой  $\omega$ . Тогда индуктивное и емкостное сопротивления соответственно равны  $\omega L$  и  $\frac{1}{\omega C}$ .

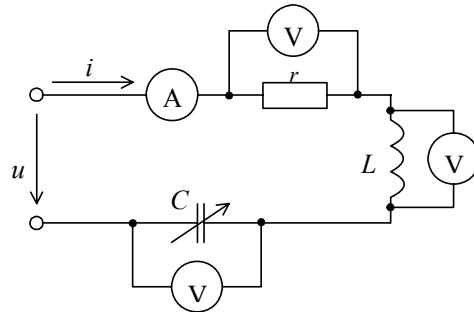


Рис. 1.23. Схема электрической цепи для изучения резонанса напряжений

Соотношения между этими сопротивлениями могут быть:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad \omega L > \frac{1}{\omega C} \quad \text{и} \quad \omega L < \frac{1}{\omega C}.$$

Из них наибольший интерес представляет случай, когда  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ .

Из этого равенства можно выразить угловую частоту:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1.58)$$

Такой формулой выражается, как известно, собственная частота  $\omega_0$  колебательного контура. Таким образом, равенство реактивных сопротивлений создает условия равенства приложенной  $\omega$  и собственной  $\omega_0$  частоты цепи при последовательном соединении элементов  $r, L, C$ .

При равенстве приложенной и собственной частоты  $\omega = \omega_0$  в электрической цепи переменного тока имеет место режим резонанса.

Условие равенства реактивных сопротивлений создает и условие равенства напряжений на них при их последовательном соединении:

$$\omega L I = \frac{1}{\omega C} I \quad \text{или} \quad U_L = U_C.$$

Поэтому данный вид резонанса называется резонансом напряжений.

Таким образом, условием резонанса напряжений является наличие в цепи переменного тока одинаковых по величине индуктивного и емкостного сопротивлений при их последовательном соединении.

Рассмотрим некоторые характерные случаи, свойственные резонансу напряжений. Ввиду равенства индуктивного и емкостного сопротивлений, реактивное сопротивление равно нулю:

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0. \quad (1.59)$$

Следовательно, полное сопротивление цепи по своей величине определяется лишь только активным сопротивлением, естественно, при его наличии в цепи:

$$Z = \sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = r. \quad (1.60)$$

Тогда закон Ома для данной цепи примет вид:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{U}{r}. \quad (1.61)$$

Ток в этом случае, как и полное сопротивление цепи, имеет активный характер.

Ввиду равенства реактивных напряжений  $U_L = U_C$  общее напряжение  $U$  равно активному напряжению  $U_r$ :

$$U = \sqrt{U_r^2 + (U_L - U_C)^2} = U_r. \quad (1.62)$$

Индуктивное и емкостное напряжения на своих участках (катушка, конденсатор) могут иметь значительные величины, в зависимости от тока и сопротивлений участков, но если они равны по величине, то друг друга взаимно компенсируют.

Векторная диаграмма при резонансе напряжений представлена на рис. 1.24.

Как видно из векторной диаграммы, общее напряжение цепи  $U$  равно активному напряжению  $U_r$  и, следовательно, ток и напряжение цепи совпадают по фазе, т.е.  $\varphi = 0$ .

Равенства индуктивного и емкостного сопротивлений, или явление резонанса напряжений, можно добиться, изменяя угловую частоту  $\omega$ , индуктивность  $L$  или емкость  $C$ . Рассмотрим изменение параметров электрической цепи и электрических величин при изменении угловой частоты  $\omega$ , вблизи области резонансной частоты  $\omega_0$ . Зависимость сопротивлений (а), напряжений, тока и угла  $\varphi$  (б) от частоты  $\omega$  приводится на рис. 1.25.

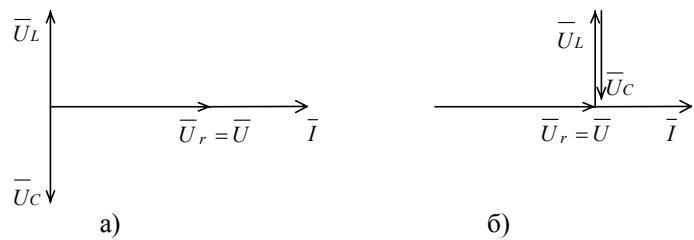


Рис. 1.24. Векторная диаграмма для режима резонанса напряжений

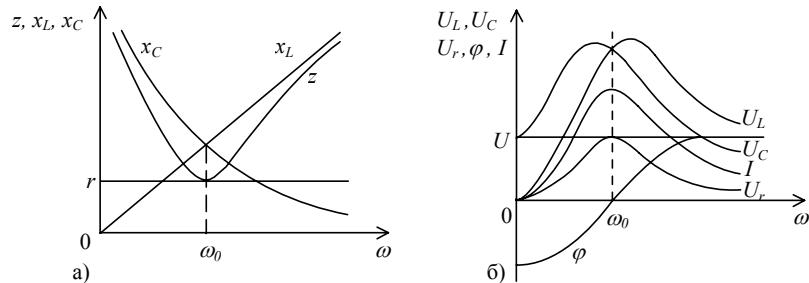


Рис. 1.25. Графики зависимости сопротивлений (а), напряжений, тока и сдвига фазы (б) в зависимости от частоты  $\omega$

Из графиков видно, что с увеличением частоты  $\omega$  пропорционально увеличивается индуктивное сопротивление  $x_L$ , а емкостное -  $x_C$  уменьшается, и при резонансной частоте  $\omega_0$  они равны между собой. В этом случае полное сопротивление  $Z$  имеет свое наименьшее значение, равное активному сопротивлению  $r$ , и ток  $I$  достигает наибольшего значения. При равенстве реактивных напряжений  $U_L = U_C$  активное напряжение  $U_r$  достигает значения, равного общему напряжению  $U$ .

При угловой частоте  $\omega$ , меньшей резонансной  $\omega_0$ , в цепи преобладает емкостная составляющая ( $x_C > x_L$ ) и соответственно емкостное напряжение  $U_C$  больше индуктивного напряжения  $U_L$ , а угол  $\varphi$  имеет отрицательный знак. При частотах больших резонансного индуктивные составляющие сопротивлений и напряжений преобладают над их емкостными составляющими ( $x_L > x_C$  и  $U_L > U_C$ ), а угол  $\varphi$  приобретает положительный знак. А при резонансе ( $\omega_0 = \omega$ ) угол  $\varphi = 0$ .

Явление резонанса напряжений необходимо учитывать на практике при работе с цепью переменного тока, где включены элементы  $r$ ,  $L$ ,  $C$  последовательно. В случае малого значения активного сопротивления  $r$  и равенстве реактивных сопротивлений  $x_L = x_C$ , ток в цепи может

достигнуть больших значений, особенно, если входное напряжение имеет большое значение. При этом напряжения на участках с элементами  $L$  и  $C$  могут значительно превышать напряжение на входе, а это может служить причиной пробоя изоляции катушки или конденсатора. Поэтому в электроэнергетических устройствах в большинстве случаев резонанс напряжений - явление нежелательное, связанное с возможностью возникновения перенапряжений, т.е. напряжений в несколько раз превышающих рабочее напряжение установки.

Но в электротехнике связи, радиотехнике явление резонанса напряжений широко используется для настройки цепи на определенную частоту.

#### 1.14. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Пусть дана электрическая цепь с параллельным соединением всех видов сопротивлений (рис. 1.26).

Расчет такой цепи или определение неизвестных электрических величин на основе заданных можно выполнить с помощью нескольких методов. Рассмотрим их.

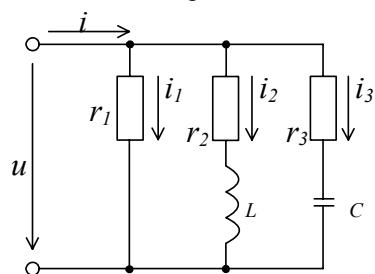


Рис. 1.26. Электрическая цепь с параллельным соединением сопротивлений

##### 1.14.1. Метод векторных диаграмм

Пусть заданы:  $U$  - входное (общее) напряжение;  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  - активные сопротивления ветвей;  $L$ ,  $C$  - величины индуктивности и емкости и  $f$  - частота синусоидального напряжения.

Необходимо рассчитать величины токов в отдельных ветвях  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , общий ток  $I$  в неразветвленной части цепи и углы сдвига по фазе  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi$ . На основе закона Ома определяются токи ветвей:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{r_1}, \quad I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + (2\pi f L)^2}},$$

$$I_3 = \frac{U}{Z_3} = \frac{U}{\sqrt{r_3^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r_3^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}}. \quad (1.63)$$

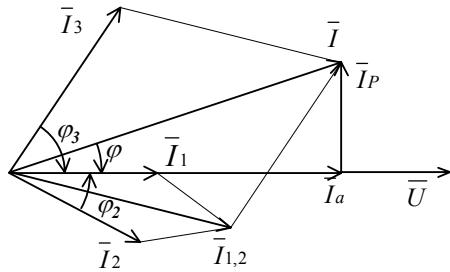
Общий ток  $I$  можно найти посредством геометрического сложения токов ветвей:  $\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$ . А для этого сначала необходимо определить углы сдвига фаз между напряжением и токами в ветвях  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ . Их можно определить из треугольника сопротивлений каждой ветви, используя формулу одной из тригонометрических функций, например:

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{x_1}{r_1}, \text{ по условию } x_1 = 0, \text{ поэтому } \varphi_1 = 0;$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{x_2}{r_2}, \text{ где } x_2 = \omega L = 2\pi f L; \quad (1.64)$$

$$\varphi_3 = \operatorname{arctg} \frac{x_3}{r_3}, \text{ где } x_3 = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Рис. 1.27. Векторное сложение токов



При построении векторной диаграммы для параллельной цепи обычно за исходный вектор принимают вектор напряжения  $U$ , (рис.1.27). Задается масштаб тока, согласно которого строятся вектора токов ветвей и определяется значение суммарного тока по длине полученного вектора.

Угол сдвига фазы между общим напряжением  $U$  и общим током  $I$  находят посредством измерения.

Метод векторных диаграмм отличается простотой, доступностью и наглядностью.

Но он обладает такими недостатками, как трудоемкость построения диаграммы, особенно если много векторов, и малой точностью.

### 1.14.2. Метод проводимостей

Метод проводимостей является аналитическим методом, где исключается использование векторной диаграммы с ее характерными недостатками. Из векторной диаграммы (рис. 1.27) можно выделить треугольник тока для неразветвленной части цепи (рис.1.28).

В данном треугольнике тока гипотенуза в масштабе выражает величину общего тока  $I$ , а катеты являются составляющими этого тока: противолежащий к углу  $\varphi$  - реактивная составляющая тока  $I_p$  и прилежащий - активная составляющая  $I_a$ .

Активная и реактивная составляющие общего тока равны:

$$I_a = I \cos \varphi \text{ и } I_p = I \sin \varphi. \quad (1.65)$$

Общий ток по закону Ома равен:

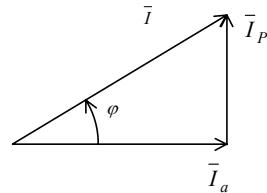


Рис. 1.28. Треугольник тока

$$I = \frac{U}{Z} = U \frac{1}{Z} = U y \text{ и} \quad (1.66)$$

$$y = \frac{1}{Z}, \quad (1.67)$$

где  $y$  - полная проводимость цепи ( $Z$  - эквивалентное полное сопротивление всей цепи).

Тогда формулы (1.65) можно представить:

$$I_a = U y \cos \varphi = U g, \quad (1.68)$$

где  $g = y \cos \varphi$  - активная проводимость;  $(1.69)$

$$I_p = U y \sin \varphi = U b, \quad (1.70)$$

где  $b = y \sin \varphi$  - реактивная проводимость  $(1.71)$

Проводимость измеряется в сименсах [См].

1 сименс – электрическая проводимость участка цепи с сопротивлением 1 Ом.

С помощью формул (1.67-1.71) можно выразить ток  $I$  и его активную и реактивную составляющие через соответствующие величины проводимостей. Чтобы использовать метод проводимостей для расчета цепи, рассмотрим, как можно выражать проводимости через

сопротивления. Как уже известно, полная проводимость есть величина, обратная полному сопротивлению.

$$y = \frac{1}{Z}.$$

А реактивные составляющие проводимости можно представить, используя приведенные выше формулы, из треугольников сопротивлений:

$$g = y \cos \varphi = \frac{1}{Z} \cdot \frac{r}{Z} = \frac{r}{Z^2}. \quad (1.72)$$

$$b = y \sin \varphi = \frac{1}{Z} \cdot \frac{x}{Z} = \frac{x}{Z^2}. \quad (1.73)$$

Теперь стороны треугольника тока можно выразить через произведения проводимостей на напряжение:

$$I = yU, \quad I_a = gU, \quad I_p = bU. \quad (1.74)$$

Посредством деления сторон треугольника тока на напряжение  $U$  можно получить треугольник проводимостей (рис. 1.29)

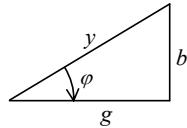
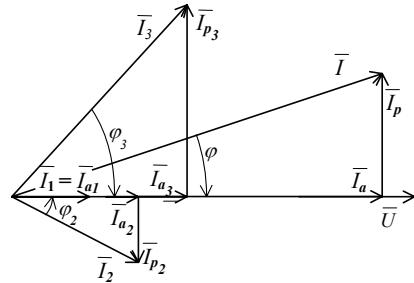


Рис. 1.29. Треугольник проводимостей

Рис. 1.30. Векторная диаграмма цепи с параллельным



Из этого треугольника можно записать известные соотношения между сторонами прямоугольного треугольника:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{b}{g} \quad (1.75)$$

Рассмотрим, как можно найти общий ток  $I$  по известным активным и реактивным составляющим токов отдельных ветвей.

На рис. 1.30 дана векторная диаграмма цепи с параллельным соединением сопротивлений (рис. 1.26) в виде треугольников токов.

Согласно заданной цепи, в первой ветви, где одно активное сопротивление  $r_1$ , протекает активный ток  $I_{a1}$  и соответственно  $\varphi_1 = 0$ . По второй ветви проходит ток  $I_2$  с активной составляющей  $I_{a2}$  и реактивной составляющей индуктивного характера  $I_{p2}$ , вектора этих токов образуют треугольник тока с положительным углом  $\varphi_2$ .

По третьей ветви проходит ток активно - емкостного характера  $I_3$ , образующий с его составляющими треугольник тока с отрицательным углом  $\varphi_3$ . Из векторной диаграммы легко можно заключить, что активная составляющая общего тока  $I_a$  равна арифметической сумме активных токов ветвей, а реактивная составляющая  $I_p$  равна алгебраической сумме реактивных токов ветвей:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}; \quad (1.76)$$

$$I_p = I_{p2} - I_{p3}. \quad (1.77)$$

Ток индуктивного характера берется со знаком «плюс», а ток емкостного характера - со знаком «минус».

Формулы (1.76 и 1.77) можно записать через проводимости:

$$I_a = gU = g_1U + g_2U + g_3U = (g_1 + g_2 + g_3)U; \quad (1.78)$$

$$I_p = bU = b_2U - b_3U = (b_2 - b_3)U,$$

$$\text{где } g = g_1 + g_2 + g_3 \quad \text{и} \quad b = b_2 - b_3. \quad (1.79)$$

Порядок расчета заданной схемы (рис. 1.26) можно представить с помощью метода проводимостей по следующей схеме:

Расчет по ветвям

№ п/п	I	II	III	Расчет для схемы в целом
1	$g_1 = \frac{r_1}{Z_1^2};$ $I_{a1} = g_1U$	$g_2 = \frac{r_2}{Z_2^2};$ $I_{a2} = g_2U$	$g_3 = \frac{r_3}{Z_3^2};$ $I_{a3} = g_3U$	$g = g_1 + g_2 + g_3$ $I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}$ или $I_a = gU$
2	$b_1 = \frac{x_1}{Z_1^2}; \quad I_{p1} = b_1U$ ( $x_1 = 0$ , поэтому $b_1 = 0$ и $I_{p1} = 0$ )	$b_2 = \frac{x_2}{Z_2^2};$ $I_{p2} = b_2U$	$b_3 = \frac{x_3}{Z_3^2};$ $I_{p3} = b_3U$	$b = b_2 - b_3$ $I_p = I_{p2} - I_{p3}$ или $I_p = bU$

3	$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}$ $I_{p1} = 0 \quad I_1 = I_{a1}$ или $I_1 = y_1 U = \sqrt{g_1^2 + b_1^2} U =$ $= g_1 U. \quad (b_1 = 0)$	$I_2 = \sqrt{I_{a2}^2 + I_{p2}^2}$ $\text{или}$ $I_2 = y_2 U =$ $= \sqrt{g_2^2 + b_2^2} U$	$I_3 = \sqrt{I_{a3}^2 + I_{p3}^2}$ $\text{или}$ $I_3 = y_3 U =$ $= \sqrt{g_3^2 + b_3^2} U$	$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$ $\text{или}$ $I = y U =$ $= \sqrt{g^2 + b^2} U$
---	---	---	---	---

Аналитический метод расчета позволяет сравнительно легко делать обобщения и выводы при анализе электрических цепей на основе полученных формул.

### 1.15. МОЩНОСТЬ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Мгновенная мощность - это мощность в данный момент времени, она определяется произведением мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = u i.$$

Рассмотрим мгновенную мощность для цепи с активно - индуктивной нагрузкой.

Тогда напряжение и ток можно выразить:

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{и} \quad i = I_m \sin \omega t.$$

Тогда мгновенная мощность синусоидального тока:

$$\begin{aligned} p &= U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t = 2UI \frac{1}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] = \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (1.80)$$

Таким образом, мгновенное значение мощности имеет две составляющие: постоянную  $UI \cos \varphi$ , не изменяющуюся во времени, и переменную  $UI \cos(2\omega t + \varphi)$ , изменяющуюся периодически с частотой  $2\omega$ .

В целом мгновенная мощность изменяется с двойной частотой. Знак мощности определяется знаками напряжения и тока. Мощность положительна, если напряжение и ток одинакового знака, и она отрицательна, если напряжение и ток имеют разные знаки. Знак мощности определяется направлением передачи электрической энергии: положительный знак соответствует передаче электрической энергии от источника к приемнику, отрицательный - от приемника к источнику. Для количественной оценки интенсивности превращения электрической энергии в другие (в тепловую, механическую и т. д.) виды энергии пользуются средним значением мощности  $P$  за период  $T$ :

$$\begin{aligned}
P_{cp} &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)] dt = \\
&= \frac{UI \cos \varphi}{T} \int_0^T dt - \frac{UI}{T} \int_0^T \cos(2\omega t + \varphi) dt. \\
\text{Так как } \int_0^T \cos(2\omega t + \varphi) dt &= 0, \text{ то } P_{cp} = UI \cos \varphi.
\end{aligned}$$

Таким образом, среднее значение мощности равно постоянной составляющей мгновенной мощности.

Средняя мощность называется активной мощностью и имеет вид:

$$P = UI \cos \varphi, \quad (1.81)$$

где  $\cos \varphi$  - коэффициент мощности.

Коэффициент мощности изменяется от 0 до 1 в зависимости от величины угла сдвига по фазе  $\varphi$ , который изменяется от 0 до  $90^\circ$ . Для цепи с активной нагрузкой  $r$  угол сдвига по фазе  $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$  и активная мощность имеет свое наибольшее значение:

$$P = UI. \quad (1.82)$$

Если выразить в формуле (1.82) активное напряжение через ток и сопротивление  $U = rI$ , то формула активной мощности примет вид:

$$P = rI^2. \quad (1.83)$$

Для цепей с индуктивной  $x_L$  или емкостной  $x_C$  нагрузкой  $\cos \varphi = 0$ , и, следовательно, активная мощность  $P = 0$ .

Активную мощность выражают в ваттах (Вт), киловаттах (кВт) и мегаваттах (МВт).

Для изучения энергетических процессов, происходящих в цепи переменного тока в течение периода, следует рассмотреть кривые мгновенной мощности. В цепи с активным сопротивлением  $r$  ток и напряжение

$i = I_m \sin \omega t$ ,  $u = U_m \sin \omega t$  совпадают по фазе ( $\varphi = 0$ ), из формулы (1.80) получим:  $p = UI - UI \cos 2\omega t$ , следовательно, мгновенная мощность этой цепи пульсирует от 0 до  $2UI$  (рис. 1.31)

Активная мощность цепи, содержащей только активное сопротивление  $r$ , будет равна  $P = UI$ , с учетом того, что  $\cos \varphi = 1$ .

В этой цепи мгновенная мощность всегда положительна; независимо от направления тока в цепи энергия передается в одном направлении от источника к приемнику, где она преобразуется в тепловую, механическую и др. виды энергии необратимо. Величина этой энергии за период  $T$  определяется площадью заштрихованной фигуры (рис. 1.31,б), ограниченной кривой мгновенной мощности и осью абсцисс.

Рассмотрим мощность цепи с индуктивностью  $L$ . Для этой цепи напряжение опережает ток на  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , т.е.  $u = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ ,  $i = I_m \sin \omega t$  и формула мгновенной мощности (1.80) примет вид:

$$p = U_m I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \sin \omega t = UI \sin 2\omega t.$$

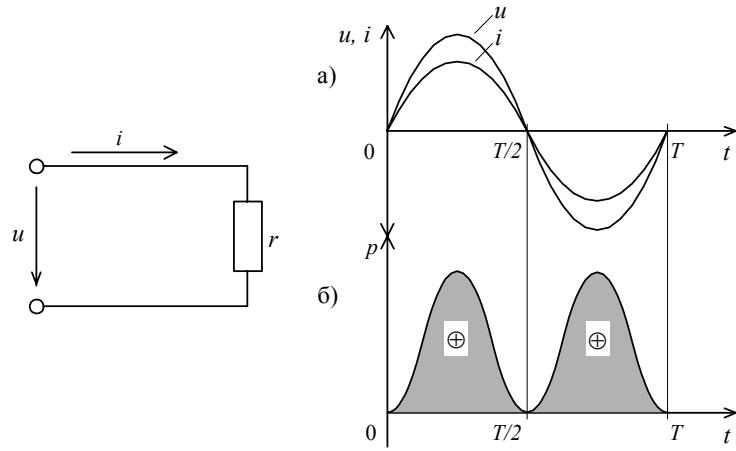
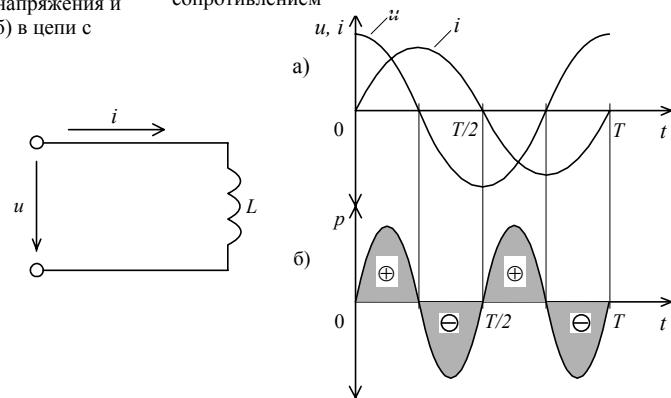


Рис. 1.31. Изменение напряжения, тока (а) и мощности (б) в цепи с активным сопротивлением

Рис. 1.32. Изменение напряжения и тока (а) и мощности (б) в цепи с индуктивностью



Как видно, мгновенная мощность имеет только переменную составляющую, изменяющуюся с двойной частотой  $2\omega$  (рис. 1.32)

В течение первой четверти периода напряжение  $u$  и ток  $i$  по направлению совпадают, мощность положительна и энергия передается от источника питания к катушке и запасается в виде энергии магнитного поля.

За вторую четверть периода ток и напряжение противоположны по направлению, мощность отрицательна, а энергия передается от индуктивного приемника к источнику.

Таким образом, за время, равное половине периода, мощность совершает одно полное колебание, и в дальнейшем такие циклы повторяются с частотой  $2\omega$ . Следовательно, в цепи с индуктивностью происходит периодически обмен энергиями между источником и приемником (катушка). Здесь нет случая необратимого превращения электрической энергии в другие виды энергии, следовательно, активная мощность равна нулю.

Интенсивность обмена электрической энергией между источником и приемником определяется реактивной мощностью индуктивного характера  $Q_L$ , равной амплитуде мгновенного значения мощности, т.е.

$$Q_L = U_L I \quad (1.84)$$

Учитывая  $U_L = U \sin \varphi$ , формулу реактивной мощности индуктивного характера можно представить:

$$Q_L = UI \sin \varphi \quad (1.85)$$

Мощность (1.84) можно выразить через индуктивное сопротивление и проводимость, если учесть  $U_L = x_L I$ , то:

$$Q_L = x_L I^2 = \frac{U_L^2}{x_L} = b_L U_L^2, \quad (1.86)$$

где  $b_L = \frac{1}{X_L}$  - индуктивная проводимость.

Реактивную мощность выражают в вольт-амперах реактивных (ВАр), киловольт - амперах реактивных (кВАр) и т.д.

Если в цепь включен конденсатор с емкостью  $C$ , то напряжение опаздывает от тока на  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , т.е.  $u = U_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ ,  $i = I_m \sin \omega t$ , и мгновенное значение мощности:

$$p = U_m I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \sin \omega t = -UI \sin 2\omega t, \quad (1.87)$$

которое отличается от предыдущего случая только знаком. Изменение этой мощности в зависимости от изменений напряжения и тока показано на рис. 1.33.

В цепи с емкостью также имеет место обмен электроэнергией между источником питания и конденсатором. Направление передачи энергии подобным же образом, как и в предыдущем случае, зависит от направления напряжения и тока. В течение первой четверти периода мощность отрицательна, электрическая энергия от конденсатора передается к

источнику питания. В течение второй четверти периода мощность положительна, электрическая энергия источника передается к конденсатору и накапливается в виде энергии электростатического поля. Далее происходит периодический обмен энергиями частотой  $2\omega$ .

Для данной цепи, ввиду отсутствия необратимого превращения электрической энергии, активная мощность равна нулю. Интенсивность обмена электрической энергией определяется реактивной мощностью емкостного характера  $Q_C$ , равной амплитуде мгновенного значения мощности:

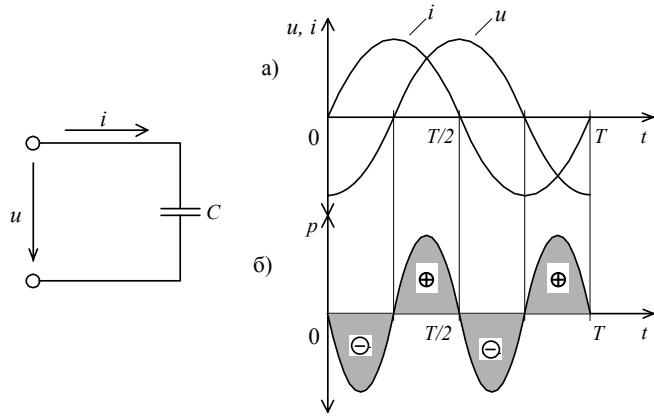


Рис. 1.33. Изменение напряжения, тока (а) и мощности (б) в цепи с емкостью

$$Q_C = U_C I. \quad (1.88)$$

Эту формулу можно представить:

$$Q_C = UI \sin \varphi \quad \text{или} \quad Q_C = x_C I^2 = \frac{U_C^2}{x_C} = b_C U_C^2, \quad (1.89)$$

где  $b_C = \frac{1}{x_C}$  – емкостная проводимость.

В общем случае, когда электрическая цепь состоит из элементов с активным и реактивным сопротивлениями, угол сдвига по фазе между напряжением и током составляет  $\varphi = 0 \div \frac{\pi}{2}$ , а мгновенное значение мощности имеет как постоянную, так и переменную составляющие:

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi).$$

Рассмотрим случай с активно-индуктивной нагрузкой. В частности, такими эквивалентными схемами при расчетах задаются двигатели переменного тока (рис. 1.34).

Энергетический процесс в цепи с элементами  $r$  и  $L$  складывается из двух процессов: во-первых, энергия передается от источника к потребителю и там необратимо превращается в другие виды энергии (механическую в двигателях); во-вторых, часть энергии колеблется между источником и катушкой индуктивности.

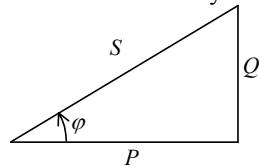


Рис. 1.35. Треугольник мощностей

Заштрихованная площадь, ограниченная кривой положительной мощности и осью абсцисс, больше площади, ограниченной кривой отрицательной мощности и осью абсцисс. Из всей электрической энергии, передаваемой к приемнику, большая часть превращается в другой вид энергии, а интенсивность превращения энергии оценивается величиной активной мощности.

Амплитуда мощности, изменяющейся с двойной частотой, определяет полную мощность цепи, она равна:

$$S = UI \quad (1.90)$$

и выражается в вольт - амперах (ВА), киловольт - амперах (кВА).

Из рассмотренных треугольников, например, из треугольника

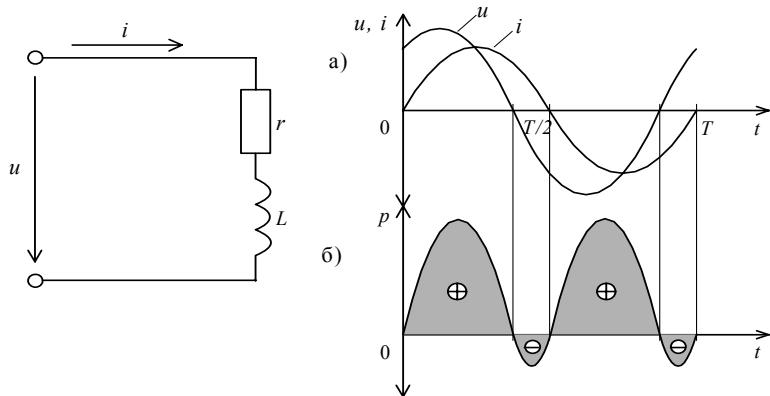


Рис. 1.34. Изменение напряжения, тока (а) и мощности (б) в цепи с активно-индуктивной нагрузкой

сопротивлений, умножив стороны его на  $I^2$ , можно получить треугольник мощностей (рис. 1.35)

Из треугольника мощностей можно получить формулы:

$$S = \sqrt{Q^2 + P^2} \text{ и } \cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (1.91)$$

$$\sin \varphi = \frac{Q}{S}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \text{ и т.д.}$$

Полная мощность определяет наибольшее значение активной мощности  $P = UI \cos \varphi$  при значении коэффициента мощности  $\cos \varphi = 1$  ( $\varphi = 0$ ), т.е.  $S = P_{max} = UI$ .

### 1.16. КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД

Для расчета цепей переменного тока широко применяется комплексный метод, основанный на использовании теории комплексных чисел.

Вектор на комплексной плоскости  $[-1] - 0 - (+1)$  — ось вещественных или действительных чисел,  $(-j) - 0 - (+j)$  — ось мнимых чисел,  $j = \sqrt{-1}$  — мнимая единица], соответствующий точке  $A$ ,

однозначно определяется комплексным числом  $\dot{A}$  (рис. 1.36).

Благодаря такому символическому изображению векторных величин, этот метод иногда называют символическим.

Комплексное число можно задать в алгебраической, тригонометрической и показательной формах:

$$\dot{A} = a + jb = A \cos \alpha + jA \sin \alpha = Ae^{j\alpha},$$

где  $A = \sqrt{a^2 + b^2}$  — модуль комплексного числа;

$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}$  — аргумент, показывающий ориентацию вектора на комплексной плоскости;

$a$  и  $b$  — соответственно вещественная и мнимая составляющие комплексного числа  $\dot{A}$ .

Переход тригонометрической формы к показательной производится с помощью формулы Эйлера  $\cos \alpha + j \sin \alpha = e^{j\alpha}$ . Как нам известно, синусоидальные электрические величины ток, напряжение и ЭДС можно представить с помощью векторов, равномерно вращающихся в положительном направлении (против хода часовой стрелки), частотой равной угловой скорости их изменения  $\omega$ . Поэтому синусоидальные

электрические величины можно задать с помощью комплексных чисел.

Выразим, например, ток  $\dot{I}$  (рис. 1.37) в комплексном виде (комплексный ток) в трех его формах:

$$\dot{I} = I' + jI'' = I \cos \alpha + jI \sin \alpha = I e^{j\alpha},$$

где  $I' = I \cos \alpha$  – вещественная часть комплексного тока (обычно она показывает величину активного тока);

$I'' = I \sin \alpha$  – мнимая часть комплексного тока (обычно равна величине реактивного тока);

$\alpha = \arctg \frac{I''}{I'}$  – аргумент комплексного тока (равен аргументу синусоидальной функции  $\alpha = \omega t + \psi$  при  $t = 0$ , он определяет начальную фазу  $\psi$ );

$I = \sqrt{I'^2 + I''^2}$  – модуль тока;

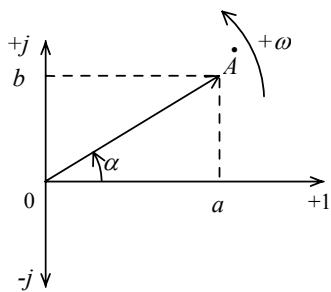


Рис. 1.36. Вектор на комплексной плоскости

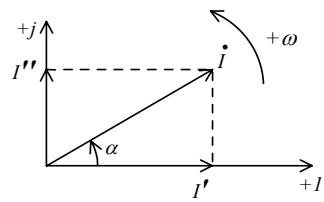


Рис. 1.37. Вектор тока на комплексной плоскости

$e^{j\alpha}$  – поворотный множитель, указывающий поворот вектора на угол  $\alpha$  при умножении заданного исходного комплексного выражения.

Если комплексный ток имеет вид  $\dot{I} = I e^{j\psi}$ , то после умножения на данный множитель получим  $\dot{I} = I e^{j\psi} e^{j\alpha} = I e^{j(\psi+\alpha)}$ , т.е. выражение, где вектор тока повернут на угол  $\alpha$ .

Оператором поворота на  $+90^\circ$  или  $\pm \frac{\pi}{2}$  является мнимая единица  $\pm j$ .

В этом легко можно убедиться на основе формулы Эйлера  $\cos \alpha + j \sin \alpha = e^{j\alpha}$ . Если  $\alpha = 90^\circ$  или  $\frac{\pi}{2}$ , то после подстановки этого значения аргумента в формулу имеем:

$$\cos 90^\circ + j \sin 90^\circ = e^{j 90^\circ} \text{ или } j = e^{j 90^\circ}$$

При противоположном знаке этого множителя, естественно, получим от его использования поворот вектора в отрицательном направлении (по часовой стрелке):

$$-j = e^{-j 90^\circ}$$

Надо учесть, что умножение комплексного выражения на  $j^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1$  является равнозначным изменению знака выражения на противоположное, т.е. вектор поворачивается в противоположном направлении или на угол  $180^\circ (\pi)$ .

При использовании комплексного метода для расчета цепей переменного тока весьма значительна роль поворотных множителей, так как постоянно необходимо учитывать фазовые сдвиги электрических величин в зависимости от характера нагрузочных сопротивлений.

Пусть цепь имеет активное сопротивление  $r$ . В этом случае, как известно, между током  $\dot{I}$  и напряжением  $\dot{U}$  нет сдвига по фазе. Для получения комплексного напряжения умножаем комплексный ток лишь на сопротивление  $r$  без использования какого-либо поворотного множителя, т.е.

$$\dot{U} = r \dot{I}$$

Следовательно, активное сопротивление  $r$  в комплексной форме берется без изменения.

Если в цепи имеется чисто индуктивное сопротивление  $x_L = \omega L$ , то, как известно, вектор напряжения имеет сдвиг по фазе относительно вектора тока на  $90^\circ$  или  $\frac{\pi}{2}$ . В этом случае комплексное напряжение  $\dot{U}$  получаем

при умножении комплексного тока  $\dot{I}$  на величину индуктивного сопротивления  $x_L = \omega L$  с поворотным множителем  $j$ , т.е. на  $jx_L = j\omega L$ .

Индуктивное комплексное сопротивление равно  $jx_L$  или  $j\omega L$ .

Легко представить, что емкостное комплексное сопротивление будет равно:

$$-jx_C = -j \frac{1}{\omega C}.$$

Тогда полное комплексное сопротивление имеет вид:

$$\underline{Z} = r + jx_L - jx_C = r + j(x_L - x_C). \quad (1.92)$$

Закон Ома для переменного тока в комплексной форме запишется:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}.$$

Для получения формулы комплексной мощности берут произведение комплексного напряжения  $\dot{U}$  на сопряженное выражение комплексного тока  $\dot{I}^*$  (комплексные числа, отличающиеся только знаком при мнимой части, называются сопряженными), т.е.

$$\begin{aligned} \dot{U} \dot{I}^* &= U e^{j\psi_u} I e^{-j\psi_i} = U I e^{j(\psi_u - \psi_i)} = \\ &= U I e^{j\varphi} = U I \cos \varphi + j U I \sin \varphi = P + jQ, \end{aligned} \quad (1.93)$$

где  $\psi_u$ ,  $\psi_i$  - соответственно аргументы комплексного напряжения и тока, равные их начальным фазам;

$\varphi$  - разность фаз между напряжением и током;

$P$  и  $Q$  - соответственно активная и реактивная мощности.

При выполнении расчетов цепей переменного тока с помощью комплексного метода необходимо помнить основные действия с комплексными числами. При сложении (вычитании) комплексных чисел отдельно складываются (вычитаются) их действительные и мнимые части:

$$(a + jb) \pm (c \pm jd) = (a \pm c) + j(b \pm d).$$

Умножение комплексных чисел выполняется по правилу умножения многочленов с учетом знака мнимой единицы  $j$ :

$$(a + jb)(c + jd) = (ac - bd) + j(ad + bc).$$

Удобнее выполнять умножение комплексных чисел, выраженных в показательной форме. При этом модуль произведения равен произведению модулей сомножителей, а аргумент произведения равен сумме аргументов сомножителей  $A e^{j\alpha} B e^{j\beta} = AB e^{j(\alpha+\beta)}$ .

При делении комплексных чисел, с целью освобождения результата от дробного выражения, нужно числитель и знаменатель умножить на сопряженное выражение знаменателя и выполнить деление по правилу деления многочлена на действительное число:

$$\frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{(ac + bd) + j(bc - ad)}{c^2 - (jd)^2} = \frac{(ac + bd) + j(bc - ad)}{c^2 + d^2}$$

Удобнее выполнять деление комплексных чисел, выраженных в показательной форме:

$$\frac{Ae^{j\alpha}}{Be^{j\beta}} = \frac{A}{B} e^{j(\alpha-\beta)}.$$

В пределах одного и того же расчета приемлемо пользоваться при необходимости всеми тремя формами задания комплексных выражений.

### 1.17. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Резонанс токов это частный случай электрического резонанса, который возникает в цепи переменного тока при общем условии равенства собственной  $\omega_0$  и вынужденной  $\omega$  частот в цепи.

Рассмотрим цепь при параллельном соединении ветвей с активно - индуктивными и активно - емкостными сопротивлениями (рис. 1.38).

Если индуктивная и емкостная проводимости параллельных ветвей равны по величине  $b_L = b_C$ , и при условии равенства активных сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  нулю, получим  $\frac{1}{\omega L} = \omega C$ ,  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$ .

Отсюда следует, что условием для получения режима резонанса тока является наличие в цепи параллельных ветвей, содержащих элементы  $L$  и  $C$ , равенство индуктивной и емкостной проводимостей этих ветвей  $b_L = b_C$ .

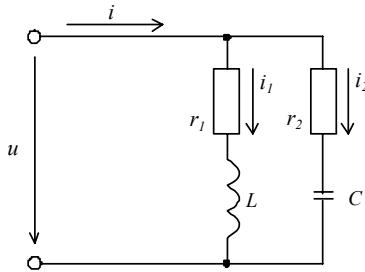


Рис. 1.38. Электрическая цепь при параллельном соединении ветвей с индуктивностью и емкостью

Рассмотрим реальную цепь с учетом сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  при условии резонанса тока:

$$b_L = b_C, \text{ где } b_L = \frac{x_L}{Z_1^2} \text{ и } b_C = \frac{x_C}{Z_2^2}.$$

Тогда полная проводимость цепи имеет свое наименьшее значение и определяется ее активной составляющей:

$$y = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_L - b_C)^2} = g, \quad (1.94)$$

где  $g = g_1 + g_2$  – общая активная проводимость параллельных ветвей,

$$g_1 = \frac{r_1}{Z_1^2} \text{ и } g_2 = \frac{r_2}{Z_2^2}.$$

Общий ток цепи  $I$  определяется ее активной составляющей и имеет свое наименьшее значение:

$$I = yU = gU = I_a. \quad (1.95)$$

Согласно условию равенства реактивных проводимостей, реактивные токи ветвей равны по величине:

$$I_L = b_L U \text{ и } I_C = b_C U, \quad I_L = I_C.$$

Активные составляющие токов могут быть определены соответственно также для каждой ветви:

$$I_{a1} = g_1 U \text{ и } I_{a2} = g_2 U.$$

Векторную диаграмму цепи при резонансе токов можно представить на рис. 1.39.

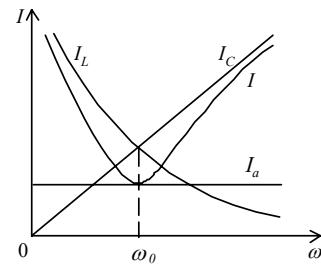
На векторной диаграмме наглядно видно, что из-за равенства по величине реактивных составляющих токов  $I_{p1}(I_L)$  и  $I_{p2}(I_C)$ , общий реактивный ток (реактивная составляющая общего тока)

$$I_{p1} - I_{p2} = I_L - I_C = I_p = 0 \text{ равен нулю.}$$

Активная составляющая общего тока  $I_a$  состоит из арифметической суммы активных токов и она образует общий ток цепи:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = I$$

Таким образом, при резонансе тока реактивные токи  $I_L$  и  $I_C$  в пределах контура из параллельных ветвей с равными реактивными проводимостями  $b_L = b_C$  взаимно компенсируют друг друга из-за равенства их величин и противоположности их направлений. Общий ток цепи имеет активный характер, следовательно, угол сдвига  $\varphi$  между током  $I$  и напряжением  $U$  равен нулю и коэффициент мощности цепи  $\cos\varphi = 1$ .



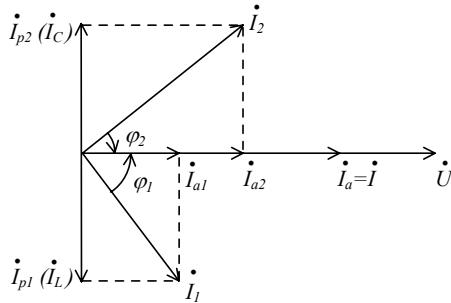


Рис. 1.39. Векторная диаграмма цепи при резонансе токов

Рис. 1.40. Изменение токов в цепи с параллельным соединением L и C при изменении частоты

Если на вход цепи с параллельным соединением  $L$  и  $C$  приложить напряжение регулируемой частоты, то можно наблюдать изменение токов в зависимости от частоты  $\omega$  и наступление резонанса токов при достижении частоты, равной собственной частоте цепи  $\omega_0$  (рис. 1.40).

Резонанс токов может быть получен также и за счет подбора параметров цепи при заданной частоте источника питания.

#### 1.18. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ

##### коэффициента мощности

Проблему повышения коэффициента мощности  $\cos\varphi$  рассмотрим для электрической цепи «Генератор-двигатель», где имеются генератор переменного тока  $\Gamma$  и подключенный к нему один из самых распространенных приемников электрической энергии - асинхронный двигатель  $\Delta$  (рис. 1.41).

Рассмотрим некоторые основные характеристики генератора. К ним относятся номинальные значения тока, напряжения и полной мощности. Величина номинального тока  $I_{nom}$  задается по условию допустимого нагрева обмотки, а величина номинального напряжения  $U_{nom}$  прочностью

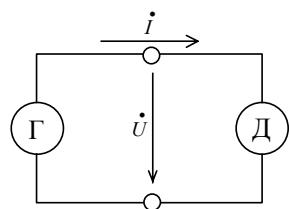


Рис. 1.41. Схема «Генератор-двигатель»

изоляции обмотки. Полная номинальная мощность генератора определяется произведением этих величин:

$$S_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}.$$

С экономической точки зрения весьма важно наиболее полное использование этой мощности посредством передачи электроэнергии от генератора к двигателю и необратимого превращения в последнем в механическую энергию.

Известно, что полная мощность  $S$  складывается из двух составляющих: активной мощности, определяющей полезную часть передаваемой электрической энергии, идущей на механическую работу; реактивной мощности, определяющей электрическую энергию, участвующую в обмене между генератором и двигателем без необратимого превращения в другие виды энергии. Часть энергии, которая определяется активной мощностью  $P$ , следует считать полезной. Чем большая часть полной мощности приходится на активную  $P$ , тем будет больше коэффициент полезного действия передачи и применения электрической

энергии в цепи. Как известно, коэффициент мощности  $\cos \varphi = \frac{P}{S}$

показывает, какая часть полной мощности  $S$  приходится на активную мощность  $P$ . Следовательно, чем больше величина  $\cos \varphi$ , тем выше при неизменном значении полной мощности  $S$  экономические показатели использования электрической энергии. Величина  $\cos \varphi$  изменяется от 0 до 1 и в зависимости от угла сдвига  $\varphi$  между током  $I$  и напряжением  $U$ . А величина угла  $\varphi$ , в свою очередь, зависит от соотношения активного и реактивного сопротивлений нагрузки. Угол  $\varphi$  принимает свое наибольшее значение  $90^\circ$ , если нагрузка состоит из реактивного элемента ( $L, C$ ), и принимает наименьшее значение, равное 0, при чисто активной нагрузке ( $r$ ). Для выяснения способа повышения  $\cos \varphi$  рассмотрим схему замещения, где асинхронный двигатель можно представить как активно - индуктивную нагрузку с параметрами  $r_D$  и  $L_D$  и векторной диаграммой этой цепи (рис. 1.42).

$r_D$  - элемент указывает на то, что в двигателе происходят необратимые процессы преобразования электрической энергии в механическую, т.е. совершается работа.

$L_D$  - элемент указывает на наличие в двигателе катушек, создающих необходимое магнитное поле.

$$\text{Из треугольника сопротивлений } \cos \varphi = \frac{r_D}{\sqrt{r_D^2 + x_{L_D}^2}}.$$

Для повышения  $\cos\varphi$ , как видно из этой формулы, можно уменьшить реактивное (индуктивное) сопротивление  $x_{L_d}$ . При  $x_{L_d} = 0$  коэффициент мощности имел бы свое наибольшее значение, равное 1.

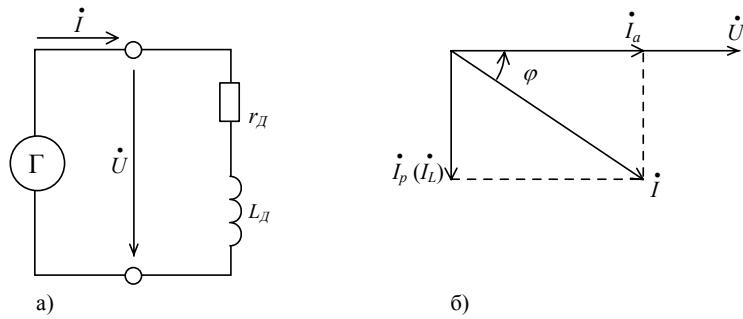


Рис. 1.42. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) цепи «генератор-двигатель»

Как отмечено,  $L_d$  с его сопротивлением  $x_{L_d}$  является необходимым элементом для двигателя. (Катушка - необходимый элемент в конструкции асинхронного двигателя).

Теперь, если обратим внимание на векторную диаграмму цепи, рис. 1.42,б, то видно, что величина угла  $\varphi$  зависит от величины реактивного тока индуктивного характера  $I_L$ .

Если будет найден способ уменьшения величины этого тока  $I_L$ , то такой способ и должен применяться для повышения коэффициента мощности  $\cos\varphi$ .

Известно, что реактивный ток одного характера (индуктивного) можно скомпенсировать равным ему по величине, но противоположным по фазе реактивным током другого характера (емкостного), если обеспечить условия для равенства токов для данной электрической цепи. С такой целью к потребителю схемы (рис. 1.42,а) можно параллельно включить конденсатор, емкостная проводимость которого  $b_C$  была бы равна индуктивной проводимости потребителя  $b_L$  (рис. 1.43,а).

Как видно из диаграммы (рис. 1.43,б), индуктивная составляющая  $I_L$  и емкостной ток  $I_C$ , будучи равными по величине (по условию  $b_L = b_C$ , тогда  $b_L U = b_C U$  или  $I_L = I_C$ ), в пределах контура электрической цепи с элементами  $r_d$ ,  $x_d$  и  $C$  компенсируют друг друга. Поэтому общий ток  $I$  не содержит в себе реактивную составляющую, и он является по характеру активным током, т.е.  $I = I_a$ . И этот общий ток  $I$  меньше по величине тока  $I_1$ , который обеспечивал такую же активную мощность  $P$ , но для цепи, где нет конденсатора  $C$  (рис. 1.42,а). Уменьшение величины тока

$I$  обеспечивает и уменьшение потерь в сети, в обмотках генераторов, трансформаторов и двигателей.

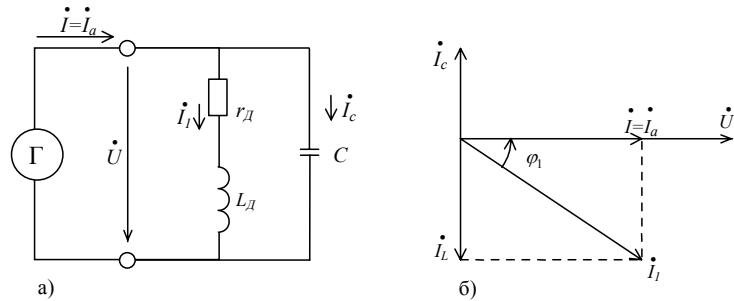


Рис. 1.43. Схема для компенсации реактивного тока потребителя и повышения  $\cos\varphi$  цепи (а), ее векторная диаграмма (б)

После компенсации реактивных токов  $I_L$  и  $I_c$  угол сдвига  $\varphi$  между током  $I = I_a$  и напряжением равен нулю. Следовательно, коэффициент мощности  $\cos\varphi = 1$ .

Обычно при помощи метода компенсации реактивных токов коэффициент мощности  $\cos\varphi$  повышают до  $0,9 - 0,95$ .

Повышение  $\cos\varphi$  установок является важной технико-экономической задачей. Нормальным считается  $\cos\varphi = 0,85 - 0,9$ .

При низком коэффициенте мощности необходимо принимать меры:

- заменяются двигатели переменного тока, нагруженные относительно мало, двигателями меньшей мощности;
- применяются синхронные двигатели, вызывающие в сети опережающий ток при режиме перевозбуждений;
- включаются параллельно приемникам конденсаторы, как рассмотрено выше.

## Глава вторая

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

#### 2.1. ПОНЯТИЕ О ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трехфазная система электрических цепей представляет собой частный случай многофазных цепей синусоидального переменного тока.

Многофазными цепями называется совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, отличающиеся по фазе одна от другой и создаваемые одним источником энергии. Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, принято называть фазой. Таким образом, понятие «фазы» в электротехнике применяется в двух значениях: первое - аргумент синусоидальных величин, второе - часть многофазной системы электрических цепей. Цепи в зависимости от количества фаз в принципе могут быть двух-, трех-, четырехфазными и т.д.

Наибольшее распространение в электроэнергетике получили трехфазные цепи. Это объясняется рядом преимуществ их по сравнению как с однофазным, так и с другими многофазными цепями, главные из которых:

- экономичность передачи электрической энергии;
- возможность сравнительно простого получения вращающегося магнитного поля, необходимого в работе трехфазного асинхронного двигателя, одного из самых распространенных и широко применяемых двигателей переменного тока;
- возможность получения в одной установке двух различных по величине эксплуатационных напряжений - фазного и линейного.

В разработку трехфазных систем свой вклад внесли ученые и изобретатели разных стран: серб Н. Тесла, русский М.О. Доливо-Добровольский, немец Ф. Хазельвандер, француз Н. Депре, американец Ч. Бредли. Наибольшая заслуга среди них принадлежит русскому электротехнику М.О. Доливо-Добровольскому (1862-1919 гг.), который сумел придать своим работам практический характер. С помощью трехфазной системы им была решена проблема передачи электрической энергии на большие расстояния. В 1891 г. на Международной электротехнической выставке в Германии впервые была осуществлена передача электрической энергии на расстояние с помощью трехфазного тока, и было убедительно доказано преимущество трехфазных цепей для таких целей. Электропередача была осуществлена от местечка Лауфен до территории выставки, расположенной во Франкфурте - на - Майне (расстояние между пунктами составляло 170 км), при линейном напряжении 15 кВ с КПД 75%.

## **2.2. ЭЛЕМЕНТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ.**

### **ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭДС И СПОСОБЫ ИХ ЗАДАНИЯ**

Трехфазная цепь состоит из трех элементов: источника электрической энергии, линии электропередачи и приемников. Источником электрической энергии является трехфазный генератор, являющийся оборудованием любого типа электрической станции.

Линию электропередачи выполняют голыми медными, а в основном, алюминиевыми проводами. Провода с помощью изоляторов прикрепляют на опорах. Тип и размеры опор, а также изоляторов зависят от величины рабочего напряжения линии электропередачи.

Приемниками, включаемыми на трехфазную цепь, могут быть однофазные приемники при их соединении звездой или треугольником, также и приемники, предназначенные для включения только на трехфазную цепь, например, асинхронные трехфазные двигатели.

Рассмотрим принцип получения трехфазной системы ЭДС с помощью трехфазного генератора.

Генератор состоит из неподвижной (статор) - 1 и подвижной (ротор) - 2 частей (рис. 2.1,а). В статоре размещаются фазные обмотки (катушки), оси их сдвинуты относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . Начала фаз (фазных обмоток) обозначаются  $A, B, C$ , а концы  $X, Y, Z$ . Ротор генератора снабжается обмоткой, и при прохождении по ней постоянного тока возбуждается магнитный поток  $\Phi$ , который замыкается по сердечникам ротора и статора.

При вращении ротора с равномерной скоростью  $\omega$  в обмотках статора индуцируются синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, но сдвинутые по фазе вследствие пространственного смещения обмоток.

Обмотки статора условно обозначаются, как указано на рис. 2.1(б).

За положительное направление ЭДС принимают направление от конца к началу обмотки.

Обычно наведенные в обмотках ЭДС имеют одинаковые

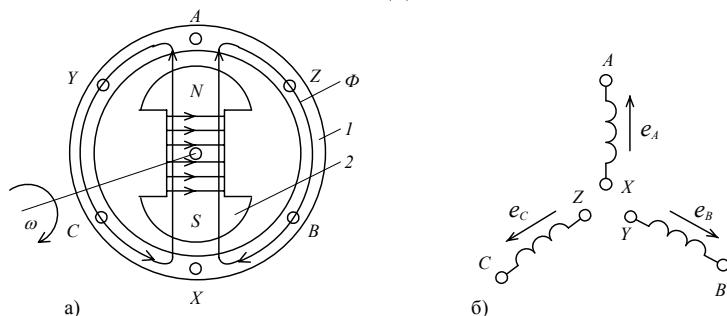


Рис. 2.1. Принципиальная схема трехфазного генератора (а)  
и обозначение его фазных обмоток с положительными направлениями ЭДС (б)

амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $\frac{2\pi}{3}$  радиана  
ввиду пространственного смещения фазных обмоток на  $120^\circ$ . Такая  
система ЭДС называется симметричной.

Система трехфазной ЭДС может быть задана в трех формах: в виде кривых мгновенных значений, в аналитической форме (формулами) и с помощью векторных диаграмм.

Трехфазная система ЭДС с помощью кривых их мгновенных значений показана на рис. 2.2.

Если ЭДС фазы А принять за исходную и считать ее начальную фазу равной нулю, то выражения мгновенных значений ЭДС можно записать в следующем виде:

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad e_B = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \quad e_C = E_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}). \quad (2.1)$$

Эти же выражения можно представить и в комплексной форме действующих значений ЭДС:

$$\dot{E}_A = E, \quad \dot{E}_B = E e^{-j \frac{2\pi}{3}}, \quad \dot{E}_C = E e^{-j \frac{4\pi}{3}}. \quad (2.2)$$

Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС показана на рис. 2.3.

По кривой мгновенных значений и по векторной диаграмме легко можно убедиться, что для трехфазной симметричной системы в любой момент времени сумма ЭДС всех фаз равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0, \quad \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (2.3)$$

### 2.3. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

Если фазы обмотки, статора электрически не соединены между собой, то система называется несвязанной (рис. 2.4).

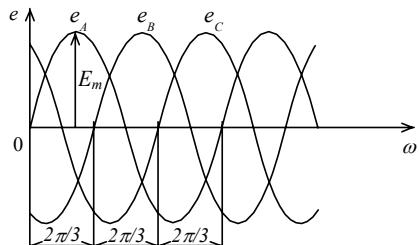


Рис. 2.2. Кривые мгновенных значений трехфазной системы ЭДС

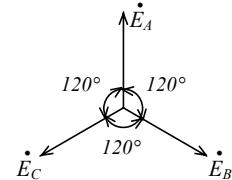


Рис. 2.3. Векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС

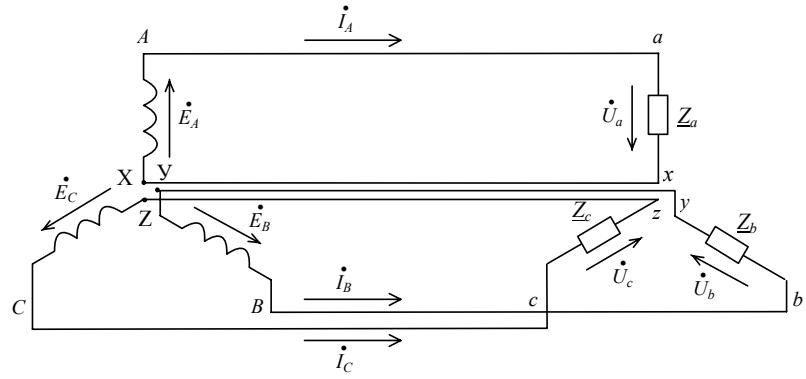


Рис. 2.4. Схема несвязанной трехфазной цепи

В такой системе каждая фаза генератора соединяется с отдельными приемниками, имеющими соответственно сопротивления  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$ . Здесь фактически получаются три однофазные системы, где, естественно, не проявляются те преимущества, которые свойственны для трехфазной системы. Поэтому несвязанные, шестипроводные цепи вследствие их независимости и большого числа соединительных проводов не нашли практического применения. Более совершенными и экономичными являются связанные цепи, в которых фазы обмотки электрически соединены между собой.

Связанные цепи бывают двух видов с соединением фаз в звезду или треугольник.

### 2.3.1. Соединение в звезду

При соединении фазных обмоток генератора в звезду их концы  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соединяют в одну общую точку  $N$ , называемую нейтральной точкой (нейтралью) генератора. Таким же способом можно соединить звездой фазы приемника (потребителя) при этом нейтральная точка обозначается буквой  $n$ .

Генератор и приемник соединяются с помощью проводов: провода, соединяющие начала фаз обмоток генератора и приемника, называются линейными; провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называется нейтральным.

Схема соединения трехфазной системы в звезду дана на рис. 2.5.

Напряжения между началом и концом фазы генератора называют фазными, а напряжения между началами фаз - линейными.

Сопротивления фазных обмоток генератора обычно пренебрежимо малы, поэтому фазные напряжения  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  практически принимают

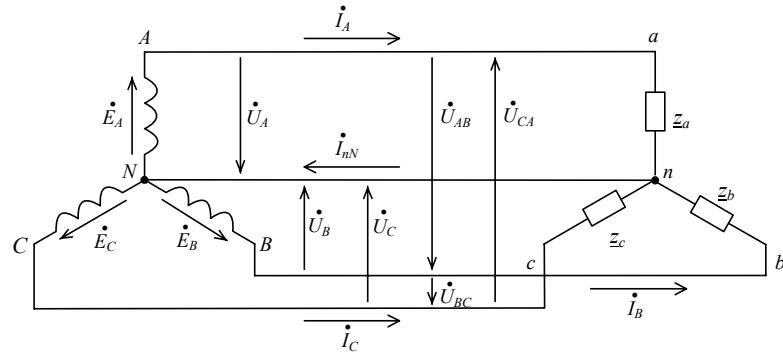


Рис. 2.5 Схема соединения трехфазной системы в звезду

численно равными фазным ЭДС  $E_A, E_B, E_C$  и изображают их симметричной системой векторов (рис. 2.6).

Важно указать положительные направления напряжений и токов. За положительное направление фазных напряжений принимают направление от начала к концу фаз обмоток.

Линейные напряжения - это напряжения между началами фаз генератора или между линейными проводами, они обозначаются  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ . Положительные направления этих напряжений указаны на рис. 2.5 и соответствуют последовательности фаз: от  $A$  к  $B$ , от  $B$  к  $C$  и от  $C$  к  $A$ . Следует отметить, что напряжения на фазах генератора  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  по величине практически равны напряжениям на фазах приемников  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  с учетом пренебрежимо малых сопротивлений линий.

Достоинством соединения звездой при четырехпроводной цепи является возможность использования двух напряжений: фазного, когда приемники включены между линейными и нейтральным проводами, и линейного, когда приемники включены между линейными проводами.

Токи, протекающие по линейным проводам  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ , можно назвать линейными, также и фазными, так как они проходят через фазы генератора и приемника. Следовательно, при соединении звездой фазные и линейные токи одинаковы по величине:

$$I_L = I_\phi. \quad (2.4)$$

За положительное направление токов  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  принято направление от генератора к приемнику. А за положительное направление тока в нейтральном проводе принимают, наоборот, направление от приемника к генератору, т.е. от нейтральной точки приемника  $n$  к нейтральной точке генератора  $N$ . С учетом этих направлений токов может быть записано уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C - \dot{I}_{nN} = 0 \quad (2.5)$$

Тогда ток нейтрального провода будет равен:

$$\dot{I}_{nN} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (2.6)$$

и, следовательно, он равен сумме (геометрической или комплексных значений) фазных или линейных токов.

Необходимо выяснить количественное соотношение между линейными и фазными напряжениями. Для этого рассмотрим схему измерения линейных напряжений с включением трех вольтметров (рис. 2.7).

По второму закону Кирхгофа для контуров  $ABNA$ ,  $BCNB$ ,  $CANC$  можно записать уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Согласно этим уравнениям, действующее значение линейных напряжений равно векторной разности соответствующих фазных напряжений, это показано на векторной диаграмме (рис. 2.8).

Для получения вектора линейного напряжения  $\dot{U}_{AB}$ , как следует из уравнений (2.7) и правила сложения векторов, необходимо к вектору на-

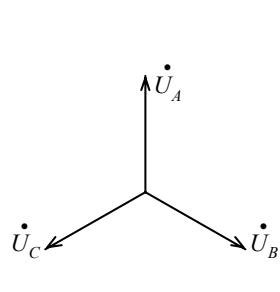


Рис. 2.6. Векторная диаграмма фазных напряжений

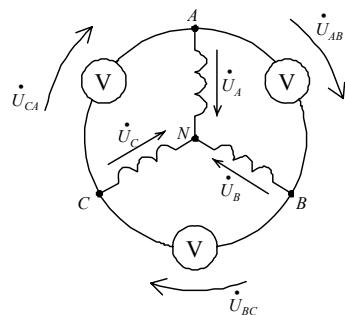
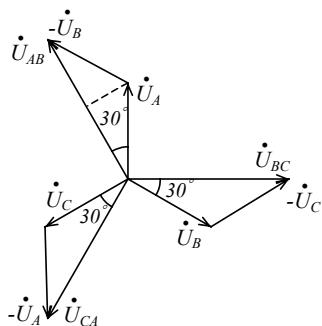


Рис. 2.7. Схема измерения линейных напряжений



напряжения  $\dot{U}_A$  прибавить вектор напряжения  $\dot{U}_B$  с противоположным знаком (направлением). Подобным образом получены вектора линейных напряжений  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_{CA}$ . Полученная векторная диаграмма представляет по виду две звезды - звезду фазных напряжений и звезду линейных напряжений. Притом звезда линейных напряжений опережает звезду фазных напряжений на угол в  $30^\circ$ . Для определения количественного соотношения линейного и фазного напряжений рассмотрим один из треугольников, полученный при построении. При вершине треугольника имеем по условию построения угол в  $120^\circ$ . Если опустить перпендикуляр из вершины этого угла на основание, то получим два прямоугольных треугольника с острыми углами в  $30^\circ$ . Катет, прилежащий к этому острому углу, соответствует половине линейного напряжения, а гипотенуза - фазному напряжению.

Тогда из прямоугольного треугольника можно записать выражения:

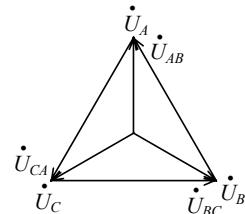
$$\begin{aligned}\frac{U_L}{2U_\phi} &= \cos 30^\circ \quad \text{или} \quad \frac{U_L}{2U_\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2}, \\ \frac{U_L}{U_\phi} &= \sqrt{3} \quad \text{или} \quad U_L = \sqrt{3} U_\phi.\end{aligned}\quad (2.8)$$

Отсюда следует вывод: линейное напряжение  $U_L$  больше фазного напряжения  $U_\phi$  в  $\sqrt{3}$  раз. Именно в таком соотношении подразделяются предусмотренные ГОСТом номинальные напряжения трехфазной сети:

$$U_L = 380 \text{ В и } U_\phi = 220 \text{ В; } U_L = 220 \text{ В и } U_\phi = 127 \text{ В.}$$

Следует учесть, что векторную диаграмму, представленную на рис. 2.8, можно показать в форме треугольника, если выполнить параллельный перенос векторов линейных напряжений.

Рис. 2.9. Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений



Эти векторные диаграммы широко применяются при расчете и анализе трехфазных цепей.

### 2.3.2. Соединение треугольником

Если фазы приемника с сопротивлениями  $Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca}$  включить непосредственно между линейным проводами трехфазной цепи, то получим соединение в треугольник (рис. 2.10).

Треугольником могут быть соединены обмотки, например, асинхронного двигателя. При прохождении переменного тока по обмоткам двигателя в них возбуждаются ЭДС самоиндукции, поэтому концы обмоток отличаются на начало и конец в зависимости от направления возникающего ЭДС. Тогда соединение в треугольник выполняется следующим образом: конец первой фазы соединяется с началом второй, а конец второй - с началом третьей и конец третьей - с началом первой.

Затем к местам соединений включаются три провода трехфазной цепи. Если же в обмотках фаз не возбуждается ЭДС, то начало и конец обмоток принимаются условно, и соединение треугольником выполняется по указанному принципу.

При соединении фаз нагрузки треугольником линейные и фазные напряжения одинаковы:  $U_L = U_\phi$ . Линии подведены к фазам нагрузки, поэтому очевидно, что линейные напряжения приложены к фазам.

Рассмотрим токи, отмеченные на схеме:  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  - линейные;

$\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$  - фазные. Положительные направления токов приняты: линейных - от генератора к приемнику, фазных - по контуру, образованному фазными обмотками в принятом положительном направлении, например, по ходу часовой стрелки. Количественные соотношения между линейными и фазными токами можно установить, если на основе первого закона Кирхгофа написать уравнения для токов относительно узлов  $a$ ,  $b$  и  $c$ :

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.\end{aligned}\tag{2.9}$$

Из уравнений следует, что любой из линейных токов равен геометрической разности токов тех двух фаз нагрузки, которые соединяются с данным линейным проводом. На рис. 2.11 дана векторная диаграмма напряжений и токов для симметричной активно-индуктивной нагрузки фаз.

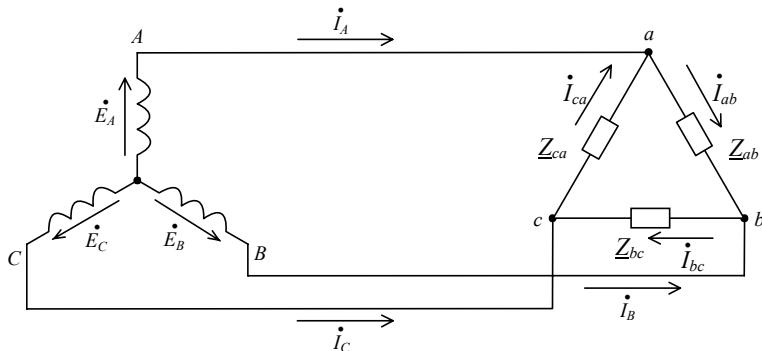


Рис. 2.10. Схема трехфазной цепи при соединении фаз нагрузки в треугольник

Из треугольников, составленных векторами токов, по аналогии с рассмотренным в предыдущем параграфе можно получить:

$$\frac{I_{\text{Л}}}{I_{\phi}} = \sqrt{3} \quad \text{или} \quad I_{\text{Л}} = \sqrt{3} I_{\phi}. \quad (2.10)$$

Таким образом, линейный ток больше фазного в  $\sqrt{3}$  раз. На основе векторной диаграммы также можно заключить, что звезда фазных токов опережает звезду линейных токов на угол в  $30^\circ$ . При симметричной нагрузке геометрическая сумма как линейных, так и фазных токов равна нулю:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C &= 0; \\ \dot{I}_{ab} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{ca} &= 0. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Векторную диаграмму (рис. 2.11) можно представить в измененной форме, если вектора линейных токов представить в форме треугольника (рис. 2.12).

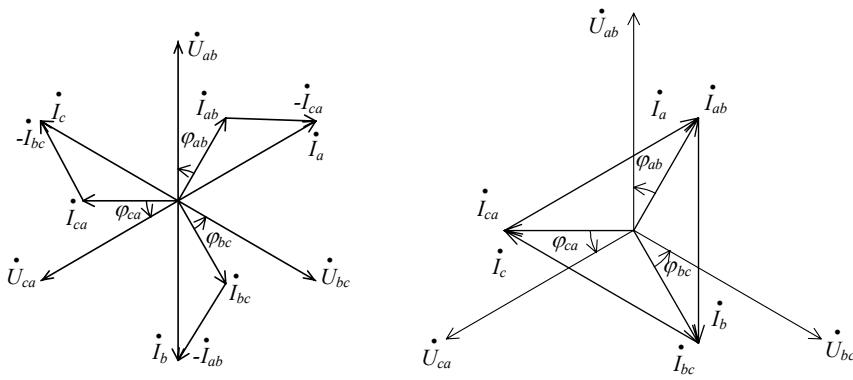


Рис. 2.11. Векторная диаграмма напряжений и токов при симметричной активно-индуктивной нагрузке

Рис. 2.12. Векторная диаграмма напряжений и токов при симметричной активно-индуктивной нагрузке, соединенной в треугольник

#### 2.4. ПОНЯТИЕ О СИММЕТРИЧНОСТИ НАГРУЗКИ И РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

При расчете трехфазной цепи важно выяснить вопрос о симметричности ее нагрузки. Нагрузка считается симметричной, если она подчиняется двум условиям:

- равномерности - полные сопротивления фаз по величине равны, т.е.

$$Z_a = Z_b = Z_c;$$

- однородности - сдвиги по фазе между током и напряжением одинаковы, т.е.

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c.$$

Нагрузка будет несимметричной, если не соблюдаются хотя бы одно из этих условий.

При симметричной нагрузке расчет трехфазной цепи можно выполнить только для одной фазы отдельно, при этом используются известные методы расчета однофазной цепи.

А в случае соединения несимметричной нагрузки звездой используется еще и формула для расчета напряжения между (узлами) нейтральными точками  $U_{nN}$  (рис. 2.13).

Для любого узла или нейтральной точки по первому закону Кирхгофа можно написать уже известное равенство, выражающее значение тока нейтрального провода:

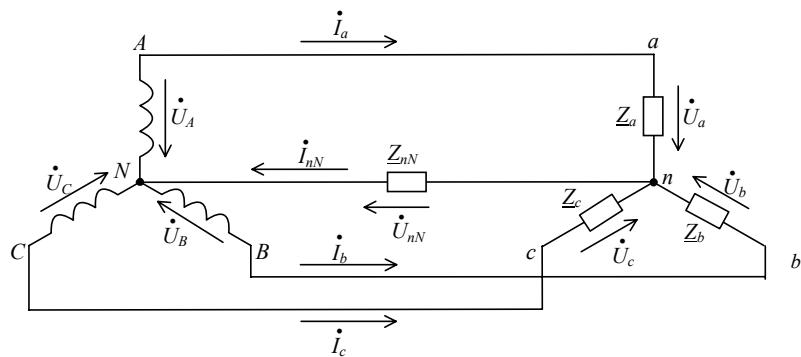


Рис. 2.13. Несимметричная звезда с учетом напряжения между узлами  $nN$

$$\dot{I}_{nN} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (2.12)$$

Этот ток нейтрального провода равен нулю в случае симметричной нагрузки. При симметричной системе напряжений ( $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  – равны по величине, вектора их смещены на  $120^\circ$ ) и симметричной нагрузке ( $Z_a = Z_b = Z_c, \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$ ) токи фаз равны по величине

$$(I_a = \frac{U_a}{Z_a}, I_b = \frac{U_b}{Z_b}, I_c = \frac{U_c}{Z_c} \text{ и } I_a = I_b = I_c),$$

и они изображаются на диаграмме также симметричной звездой (рис. 2.14). Из этой векторной диаграммы очевидно, что геометрическая сумма фазных токов равна нулю.

Следовательно, при симметричной нагрузке в нейтральном проводе ток отсутствует ( $I_{nN} = 0$ ), и соединение звездой можно осуществить с помощью трехпроводной линии, т.е. без нейтрального провода. Характерным примером симметричной нагрузки может служить трехфазный асинхронный двигатель. При соединении фазных обмоток двигателя звездой можно его включить в трехпроводную сеть без нейтрального провода.

При несимметричной нагрузке токи в фазах будут различны по величине или сдвигу фаз, поэтому ток в нейтральном проводе не равен нулю. Притом, чем больше степень несимметричности нагрузки, тем будет больше этот ток. Благодаря нейтральному проводу напряжение на каждой фазе приемника при изменениях нагрузки практически остается неизменным и равным фазному напряжению генератора. Притом этот эффект «выравнивания» фазных напряжений зависит от величины сопротивления самого нейтрального провода. Рассмотрим случай несимметричной нагрузки с учетом сопротивления нейтрального провода т.е. при  $Z_{nN} \neq 0$ .

Сначала определим напряжение на нейтральном проводе, оно равно напряжению между узлами или нейтральными точками приемника и генератора  $nN$ . Каждый из токов известного уравнения  $\dot{I}_{nN} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$  можно выразить через произведение соответствующего напряжения и проводимости:

$$\dot{I}_{nN} = \dot{U}_{nN} \underline{Y}_{nN}; \dot{I}_a = \dot{U}_a \underline{Y}_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b \underline{Y}_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c \underline{Y}_c, \quad (2.13)$$

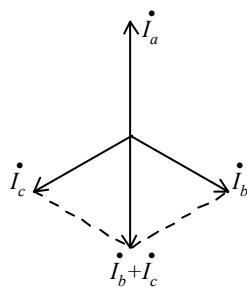


Рис. 2.14. Векторное сложение симметричной звезды фазных токов

где  $\underline{Y}_{nN}$ ,  $\underline{Y}_a$ ,  $\underline{Y}_b$ ,  $\underline{Y}_c$  - комплексные полные проводимости нейтрального провода и приемников фаз.

Для контуров (рис. 2.13) по второму закону Кирхгофа получим:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a + \dot{U}_{nN} - \dot{U}_A &= 0, \\ \dot{U}_b + \dot{U}_{nN} - \dot{U}_B &= 0, \\ \dot{U}_c + \dot{U}_{nN} - \dot{U}_C &= 0,\end{aligned}$$

где  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  - напряжения на фазах генератора.

Из этих равенств можно выразить напряжения на фазах приемника:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}. \quad (2.14)$$

Подставим выражения (2.13) и (2.14) в исходную формулу (2.12) и получим:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{nN} \underline{Y}_{nN} &= (\dot{U}_A - \dot{U}_{nN}) \underline{Y}_a + (\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}) \underline{Y}_b + (\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}) \underline{Y}_c \quad \text{и} \\ \dot{U}_{nN} (\underline{Y}_{nN} + \underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c) &= \dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c\end{aligned}$$

Из последнего равенства находим напряжение между нейтральными точками генератора и приемника:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_{nN} + \underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}. \quad (2.15)$$

Расчет цепи при соединении несимметричной нагрузки звездой можно выполнить в следующем порядке.

Определяется напряжение между нейтральными точками  $\dot{U}_{nN}$ , вычисляются напряжения на фазах приемника (2.14) и рассчитываются токи отдельных фаз:

$$I_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}, \quad I_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}, \quad I_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}.$$

Затем с помощью сложения этих токов (2.12) определяется ток нейтрального провода  $\dot{I}_{nN}$ .

Рассмотрим влияние величины напряжения между нейтралями  $U_{nN}$  на степень равномерности напряжений на фазах приемника. Согласно выражениям (2.14) представим векторную диаграмму фазных напряжений (рис. 2.15).

Как видно из векторной диаграммы, с увеличением напряжения на нейтральном проводе  $U_{nN}$  отличия значений фазных напряжений приемника  $U_a, U_b, U_c$  увеличиваются.

Нежелательность такого случая в работе электроприемников отдельных фаз очевидна, ибо потребители электроэнергии выпускаются на стандартные напряжения, например, на 220 В. Легко представить картину, в таком случае, с лампами накаливания: на фазах с малым напряжением - недокал, а на фазах с перенапряжением - их перегорание.

Величина напряжения нейтрального провода, естественно, зависит от его сопротивления. При больших сопротивлениях нейтрального провода падение напряжения на нем увеличивается, и отличие фазных напряжений друг от друга соответственно больше, что является нежелательным. При сопротивлении нейтрального провода, близком к нулю, напряжением на нем практически можно пренебречь, и тогда фазные напряжения приемника равны фазным напряжениям генератора, которые поддерживаются по величине постоянными:

$$U_A = U_a; \quad U_B = U_b; \quad U_C = U_c.$$

Обычно нейтральный провод выполняется из провода, с целью уменьшения его сопротивления, достаточно большого сечения. В случае обрыва нейтрального провода ( $Z_{nN} \rightarrow \infty$ ), в зависимости от степени несимметрии фазных нагрузок, напряжения на них будут иметь самые наибольшие отличия друг от друга. Поэтому на нейтральном проводе не

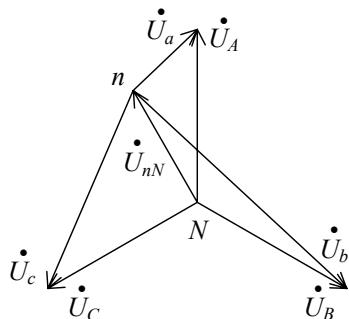


Рис. 2.15. Векторная диаграмма напряжений с учетом напряжения на нейтральном проводе

ставят никаких отключающих его устройств, такие, как плавкие предохранители или защитные автоматы.

## 2.5. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

Активная мощность трехфазной системы определяется суммой активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_{\phi 1} + P_{\phi 2} + P_{\phi 3}.$$

В симметричной трехфазной системе мощности, потребляемые приемниками отдельных фаз, одинаковы, т.е.

$$P_{\phi 1} = P_{\phi 2} = P_{\phi 3} = P_{\phi}.$$

Тогда мощность трехфазной системы будет равна  $P = 3P_{\phi}$ .

Активная мощность одной фазы выражается известной формулой однофазного синусоидального тока:  $P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$ , где  $\varphi$  - угол сдвига фаз между фазными напряжением и током.

Расчет мощности трехфазной системы можно вести и через линейные напряжение и ток. Используя известные формулы, при соединении нагрузок звездой и треугольником соответственно имеем:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \quad I_{\phi} = I_{\text{л}} \quad \text{и} \quad U_{\phi} = U_{\text{л}}, \quad I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}.$$

В любом из этих случаев получим одно и то же выражение для активной мощности симметричной трехфазной системы:

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi. \quad (2.16)$$

Подобными же выражениями определяется и реактивная мощность симметричной трехфазной системы:

$$\begin{aligned} Q &= 3Q_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi \quad \text{или} \\ Q &= \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Полная мощность симметричной трехфазной системы также может быть выражена как через фазные, так и через линейные величины:

$$\begin{aligned} S &= 3U_{\phi} I_{\phi} \quad \text{или} \\ S &= \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

### 2.5.1. Измерение активной мощности трехфазной системы

В случае симметричной трехфазной системы достаточно измерить мощность одной фазы  $P_\phi$  и полученный результат утроить. Схема измерения мощности одной фазы в случае соединения звездой (а) и треугольником (б) дана на рис. 2.16.

Если к трехфазной сети включена несимметричная нагрузка, то для измерения мощности всей системы используется метод трех ваттметров, т.е. на каждую фазу включается по ваттметру (рис. 2.17).

Общая мощность при этом равна сумме показаний всех трех ваттметров.

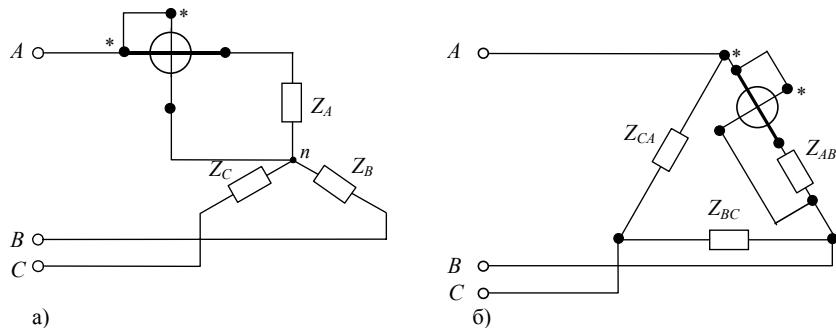


Рис. 2.16. Схемы измерений мощности одной фазы при соединении нагрузок звездой (а) и треугольником (б)

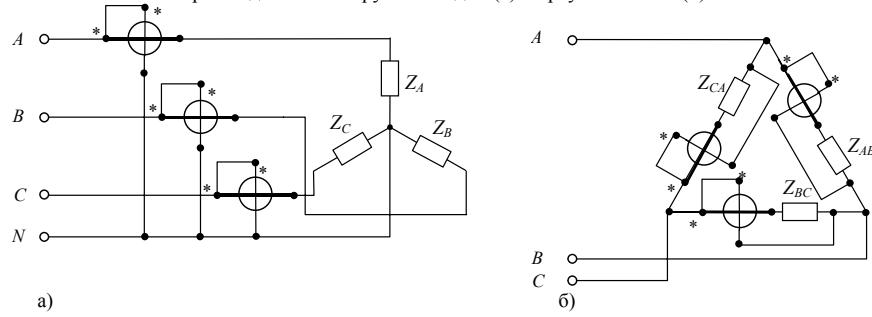


Рис. 2.17. Схемы измерений мощности трехфазной системы в случае несимметричной нагрузки методом трех ваттметров при соединении звездой (а) и треугольником (б)

В трехфазных трехпроводных системах мощность при несимметричной и также симметричной нагрузках можно измерить еще и методом двух ваттметров (рис. 2.18). Для доказательства справедливости этого метода выразим мгновенную мощность системы через мгновенные значения напряжений и токов. В случае соединения фаз приемника звездой мгновенная мощность равна:

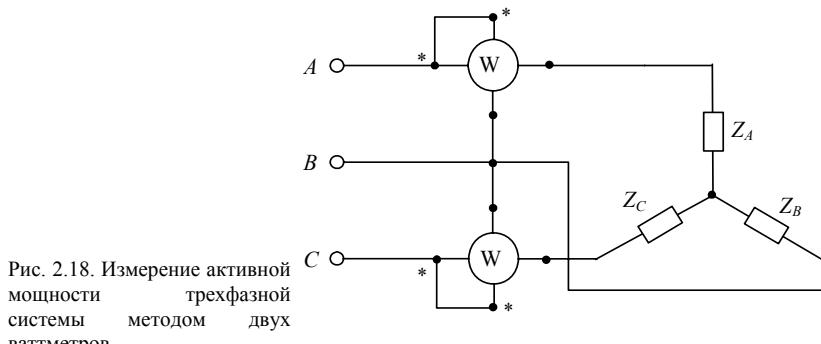
$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C . \quad (2.19)$$

Известное соотношение  $i_A + i_B + i_C = 0$  позволяет выразить ток фазы  $B$ , где не включен ваттметр:

$$i_B = -(i_A + i_C) .$$

Подставив это значение тока  $i_B$  в выражение мгновенной мощности (2.19), получим:

$$p = (u_A - u_B) \cdot i_A + (u_C - u_B) \cdot i_C . \quad (2.20)$$



Так как разность фазных напряжений равна соответствующему линейному напряжению, т.е.

$$u_A - u_B = u_{AB} \quad \text{и} \quad u_C - u_B = u_{CB} .$$

Таким образом, мгновенная мощность:

$$p = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C . \quad (2.21)$$

Полученная формула показывает, что мгновенная мощность трехфазной системы может быть представлена двумя составляющими  $p_1 = u_{AB} i_A$  и  $p_2 = u_{CB} i_C$ , и активная мощность системы может быть измерена двумя ваттметрами. На основе формулы (2.21) можно написать выражение активной мощности в действующих значениях линейного напряжения и тока:

$$P = P_1 + P_2 = U_{AB} \overset{\circ}{I}_A \cos(U_{AB} \overset{\wedge}{I}_A) + U_{CB} \overset{\circ}{I}_C \cos(U_{CB} \overset{\wedge}{I}_C) .$$

Так как  $U_{AB}, U_{CB}$ ,  $I_A$  и  $I_C$  - соответственно линейные напряжения и токи, то полученное выражение справедливо и при соединении потребителей треугольником.

В полученной формуле необходимо выяснить значение углов сдвига между напряжением и током. Для этого на рис. 2.19 приведена векторная диаграмма напряжений и токов при симметричном активно-индуктивном приемнике в случае соединения звездой.

Здесь  $\alpha$  - угол между векторами  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{I}_A$ , а  $\beta$  - угол между векторами  $\dot{U}_{CB}$  и  $\dot{I}_C$ .

Согласно векторной диаграмме для симметричного активно-индуктивного приемника имеем:

$$P = UI \cos \alpha + UI \cos \beta = UI \cos(\varphi + 30^\circ) + UI \cos(\varphi - 30^\circ).$$

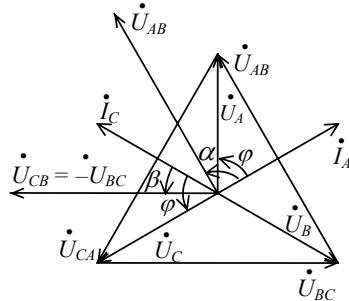


Рис. 2.19. Векторная диаграмма напряжений и токов при симметричном активно-индуктивном приемнике в случае соединения звездой

Из этого выражения следует, что даже при симметричном приемнике показания двух ваттметров могут быть разные. Показания будут одинаковы, если  $\varphi = 0$ , т.е. при активных характеристиках нагрузок. Если  $\varphi = 60^\circ$ , то

показание первого ваттметра будет равно 0, а при  $\varphi > 60^\circ$  показание этого ваттметра будет отрицательным, в этом случае для определения мощности трехфазной системы следует произвести алгебраическое суммирование показаний ваттметров. Для отсчета отрицательного показания для ваттметров, имеющих «0» в начале шкалы, необходимо пользоваться переключателем полярности.

В производственных условиях для измерения мощности трехфазной системы пользуются трехфазными ваттметрами. Для измерения в трехпроводных системах они снабжаются двумя измерительными механизмами, а в четырехпроводных системах - тремя измерительными механизмами, связанными общей осью, воздействующей на стрелку прибора.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### КАТУШКА СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### 3.1. ПЕРЕМЕННЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОТОК В КАТУШКЕ СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ.

##### Уравнение трансформаторной ЭДС

Катушка со стальным сердечником находит широкое применение в различных электротехнических устройствах переменного тока (в электрических машинах, трансформаторах, в аппаратуре управления и защиты и т.д.).

Обмотка катушки обычно выполняется из изолированного медного провода, а сердечник из ферромагнитного материала. Сердечник служит магнитопроводом, он усиливает магнитное поле тока катушки и создает магнитному потоку необходимую конфигурацию.

Рассмотрим характер изменения магнитного потока в замкнутом стальном сердечнике в зависимости от переменного напряжения, включенного на вход катушки с числом витков  $W$  (рис. 3.1).

Пусть напряжение имеет синусоидальный характер:

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (3.1)$$

Переменное напряжение должно возбуждать в катушке переменный ток  $i$ . Намагничающее действие этого тока создает в стальном сердечнике переменный магнитный поток  $\Phi$ , который возбуждает в катушке ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -W \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.2)$$

Если пренебречь активным сопротивлением катушки ( $r \rightarrow 0$ ) и магнитным потоком рассеяния  $\Phi_p$ , замыкающегося вблизи катушки по воздуху (идеализированная катушка), то можно считать, что приложенное напряжение уравновешивает ЭДС самоиндукции:

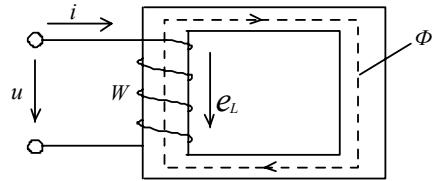


Рис. 3.1. Катушка со стальным сердечником

$$u = -e_L. \quad (3.3)$$

С учетом формул (3.1) и (3.2) имеем:

$$u = U_m \sin \omega t = W \frac{d\Phi}{dt}, \quad d\Phi = \frac{U_m}{W} \sin \omega t dt, \quad (3.4)$$

$$\Phi = \int \frac{U_m}{W} \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{\omega W} \cos \omega t = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi f W} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}),$$

$$\text{где } \Phi_m = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi f W} \text{ - амплитуда магнитного потока.} \quad (3.5)$$

Из полученного выражения (3.5) можно сделать вывод: если катушка со стальным сердечником включена на синусоидальное напряжение, то магнитный поток, возбуждаемый в сердечнике, также меняется по синусоидальному закону, и он отстает по фазе от напряжения на  $\pi/2$ .

Из выражения (3.5) получим:

$$U = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f W \Phi_m = 4,44 f W \Phi_m. \quad (3.6)$$

С учетом равенства численных значений напряжения и ЭДС самоиндукции (3.3) получим уравнение:

$$E = 4,44 f W \Phi_m. \quad (3.7)$$

Это выражение применяют для расчета ЭДС, индуцируемых в обмотках трансформаторов, поэтому его называют уравнением трансформаторной ЭДС.

### 3.2. ТОК КАТУШКИ СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Обычно под воздействием синусоидального напряжения  $u = U_m \sin \omega t$  в ранее рассмотренных случаях, возникал ток в цепи также синусоидального характера. Рассмотрим теперь, каков же будет характер изменения намагничивающего стальной сердечник тока, протекающего через обмотку катушки, под действием синусоидального напряжения. Для

этого представим графические зависимости (рис. 3.2) магнитного потока от времени  $\Phi = f(t)$  (она задана за половину периода) и магнитного потока от намагничивающего тока  $\Phi = f(i)$ .

На основе зависимости  $\Phi(i)$  получим кривую изменения тока в зависимости от времени  $i = f(t)$ .

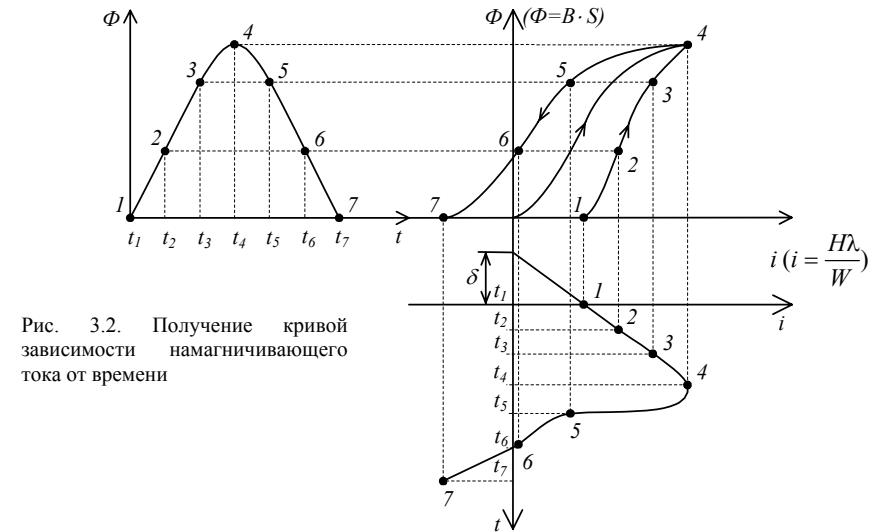


Рис. 3.2. Получение кривой зависимости намагничивающего тока от времени

Кривая зависимости магнитного потока от намагничивающего тока  $\Phi(i)$  определяется петлей гистерезиса, так как она определяется зависимостью индукции магнитного поля стального сердечника от напряженности магнитного поля  $B = f(H)$  при постоянстве площади сечения  $S$  и числа витков катушки  $W$ . Для получения кривой  $i = f(t)$  выполним построение в следующей последовательности.

На первом графике  $\Phi(t)$  полупериод разбивается на одинаковые промежутки времени  $t_1, t_2, \dots, t_7$ . Значения магнитного потока  $\Phi$ , соответствующие этим временам, отмечены цифрами 1, 2, …, 7. Эти значения магнитного потока переносятся на второй график  $\Phi(i)$ , где также отмечены соответствующими цифрами 1, 2, …, 7. Абсциссы этих точек определяют значения намагничивающего тока в указанные моменты времени.

Для построения кривой  $i = f(t)$  предварительно вертикальная ось времени разбивается на одинаковые промежутки времени как на первом графике. Затем абсцисса второго графика  $\Phi(i)$  используется в качестве

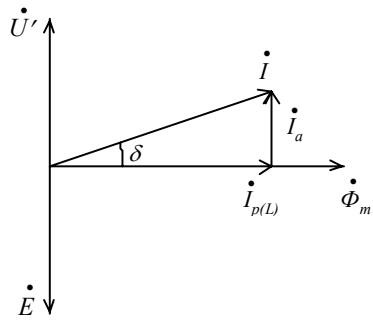


Рис. 3.3. Векторная диаграмма идеализированной катушки ( $r=0$ ,  $\Phi_p=0$ ) со стальным сердечником

ординаты для третьего графика и получают точки 1, 2, ..., 7 для построения кривой тока  $i = f(t)$ .

По форме полученной кривой можно заключить, что ток катушки со стальным сердечником или ток, намагничивающий сталь, имеет несинусоидальный характер изменения. Как видно из графика, намагничивающий ток опережает магнитный поток по фазе на угол  $\delta$ . Величина этого угла определяется шириной петли гистерезиса, а ширина определяет площадь петли. Как известно, площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии потерь на цикл намагничивания ферромагнитного материала. Поэтому угол  $\delta$  получил название угла магнитных потерь.

При расчете цепей несинусоидального тока такой ток обычно заменяется эквивалентным синусоидальным током. Эквивалентность определяется двумя условиями: равенством действующих значений синусоидального и несинусоидального токов, равенством активных мощностей этих токов.

Для анализа и расчета цепей, содержащих катушку со стальным сердечником, можно использовать векторную диаграмму (рис. 3.3) идеализированной катушки.

Ток, проходящий по катушке со стальным сердечником, может быть представлен в виде двух составляющих:

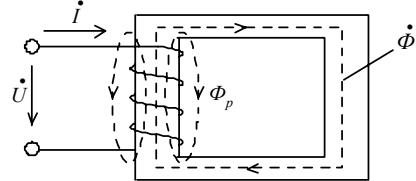
$I_{p(L)}$  - намагничивающий ток (реактивный ток индуктивного характера);

$I_a$  - активный ток, он обусловлен потерями в стальном сердечнике.

### 3.3. РЕАЛЬНАЯ КАТУШКА, ЕЕ УРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ, ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Изучая реальную катушку (рис. 3.4), необходимо учитывать активное сопротивление обмотки  $r$  и магнитный поток рассеяния  $\Phi_p$ . Обычно эти величины малы по значению.

Рис. 3.4. Катушка с учетом потока рассеяния  $\Phi_p$  и сопротивления  $r$



Магнитная проницаемость стали во много раз больше магнитной проницаемости воздуха. Вследствие этого небольшая часть магнитного потока катушки замыкается по воздуху, эту часть магнитного потока называют потоком рассеяния  $\Phi_p$ . В отличие от потока в сердечнике  $\Phi$  поток рассеяния линейно зависит от намагничивающего тока и совпадает с этим током по фазе.

Произведение числа витков  $W$  и потока рассеяния  $\Phi_p$ , как известно, будет потокосцеплением рассеяния:

$$\Psi_p = W \Phi_p. \quad (3.8)$$

Индуктивность потока рассеяния, согласно (1.31), равна:

$$L_p = \frac{\Psi_p}{i}.$$

В обмотке катушки поток рассеяния индуцирует ЭДС рассеяния:

$$e_p = -\frac{d\Psi_p}{dt} = -L_p \frac{di}{dt}. \quad (3.9)$$

С учетом эквивалентной замены несинусоидального намагничивающего тока ЭДС рассеяния будет равна:

$$\dot{E}_p = -j\omega L_p \dot{I} = -jX_p \dot{I}. \quad (3.10)$$

Величина  $X_p$  называется индуктивным сопротивлением рассеяния.

Таким образом, ток зависит от напряжения  $u$ , также еще от индуцируемых ЭДС  $e$  и  $e_p$ , т.е.:

$$i = \frac{u + e + e_p}{r},$$

тогда напряжение, на которое включена катушка, равно:

$$u = (-e) + ri + (-e_p). \quad (3.11)$$

В действующих значениях величин выражение (3.11) имеет вид:

$$\dot{U} = (-\dot{E}) + r\dot{I} + (-\dot{E}_p) \text{ или с учетом (3.10) получим:}$$

$$\dot{U} = -\dot{E} + r\dot{I} + jX_p\dot{I} = -\dot{E} + (r + jX_p)\dot{I} = -\dot{E} + \underline{Z}\dot{I} = \dot{U}' + \underline{Z}\dot{I}, \quad (3.12)$$

где  $\underline{Z}$  - полное внутреннее сопротивление катушки;  $\dot{U}' = -\dot{E}$  - напряжение на входе идеализированной катушки.

Полученное уравнение можно назвать уравнением электрического состояния реальной катушки.

На основе уравнения электрического состояния (3.12) можно построить векторную диаграмму реальной катушки (рис. 3.5). В качестве исходного вектора удобно взять амплитуду вектора магнитного потока в сердечнике  $\dot{\Phi}_m$ .

Вектор эквивалентного синусоидального тока  $\dot{I}$  опережает вектор потока  $\dot{\Phi}_m$  на угол магнитных потерь  $\delta$ . Намагничивающий ток и поток рассеяния совпадают по фазе.

Ток  $\dot{I}$  можно представить в виде активной  $\dot{I}_a$  и реактивной  $\dot{I}_{p(L)}$  составляющей. Активная составляющая тока  $\dot{I}_a$  совпадает по фазе с напряжением  $\dot{U}'$ , а реактивная составляющая  $\dot{I}_{p(L)}$ , как ток индуктивного характера, отстает по фазе от напряжения  $\dot{U}'$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ . Напряжение  $\dot{U}'$  уравновешивает ЭДС  $\dot{E}$ , индуцируемую в обмотке потоком с амплитудой

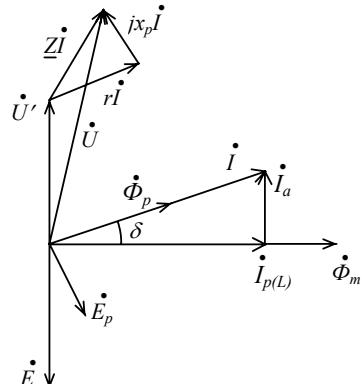


Рис. 3.5. Векторная диаграмма реальной катушки со стальным сердечником

$\dot{\Phi}_m$ . Вектора ЭДС  $\dot{E}$  и  $\dot{E}_p$  отстают от соответствующих магнитных потоков  $\dot{\Phi}$  и  $\dot{\Phi}_p$ , индуцирующих их, на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Для получения напряжения  $\dot{U}$  между выводами реальной катушки, согласно уравнения электрического состояния к напряжению идеализированной катушки  $\dot{U}'$ , следует прибавить напряжение на активном сопротивлении  $\dot{U}_r = r\dot{I}$  (совпадает по фазе с током  $\dot{I}$ ) и напряжение на индуктивном сопротивлении  $jX_p\dot{I}$  (опережает ток  $\dot{I}$  по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ ).

Для расчета удобно заменить катушку со стальным сердечником эквивалентной схемой (схемой замещения), состоящей из нескольких электрически соединенных элементов (рис. 3.6).

Основанием для составления такой схемы служит уравнение электрического состояния катушки:

$$\dot{U} = \dot{U}' + r\dot{I} + jX_p\dot{I},$$

где  $\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_{p(L)}$ .

Ток катушки проходит через участок с сопротивлением  $\underline{Z} = r + jX_p$ , являющимся, как отмечали, полным внутренним сопротивлением катушки.

Затем ток  $\dot{I}$  распределяется по двум ветвям. Одна из них - ветвь намагничивающего тока  $\dot{I}_{p(L)}$  с индуктивной проводимостью  $b_L$ . По

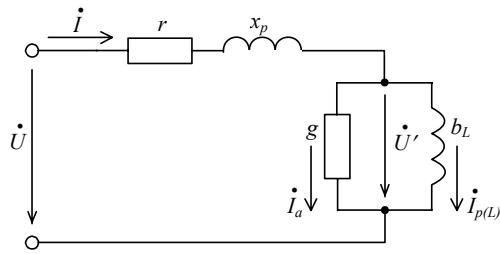


Рис. 3.6. Схема замещения катушки со стальным сердечником

второй ветви с активной проводимостью  $g$  проходит ток активного характера  $\dot{I}_a$ , обусловленный потерями в стали сердечника. Разветвленная часть схемы, которая находится под напряжением  $\dot{U}'$ , замещает идеализированную катушку с ее параметрами. Таким образом, эквивалентная схема или схема замещения катушки состоит из участка  $\underline{Z}$  с постоянными параметрами  $r$  и  $X_p$ , изображающего обмотку катушки, и из разветвленного участка, изображающего собственно сердечник (магнитную цепь) катушки; параметры этого участка  $b_L$  и  $g$  непостоянны.

### 3.4. ПОТЕРИ В СТАЛЬНОМ СЕРДЕЧНИКЕ

#### *при переменном намагничивании*

Потери мощности переменного тока в стальном сердечнике складываются от двух факторов: от гистерезиса и от вихревых токов.

Известно, что потери в стали от гистерезиса за один цикл переменного намагничивания пропорциональны площади петли гистерезиса. Потери от гистерезиса в стали в основном определяются по экспериментальным формулам. Эти потери пропорциональны частоте тока, под действием которого происходит переменное намагничивание стали. В общем виде мощность потерь от гистерезиса:

$$P_\Gamma = \sigma_\Gamma f B_m^n G,$$

где  $f$  - частота тока;  $G$  - вес сердечника;  $\sigma_\Gamma$  - гистерезисный коэффициент, значение которого зависит от сорта стали;  $B_m$  - амплитуда магнитной индукции. Значение показателя степени экспериментально подобрано в пределах  $n=1,6-2$  в зависимости от того  $B_m < 1 \text{ Тл}$  или  $B_m > 1 \text{ Тл}$ .

Для уменьшения потерь от гистерезиса применяются ферромагнитные материалы с узкой петлей гистерезиса. Таким материалом является электротехническая сталь.

При изменении магнитного потока в стальном сердечнике индуцируются вихревые токи, замыкающиеся внутри этого сердечника. Эти токи в соответствии с законом Ленца оказывают размагничивающее действие, поэтому распределение магнитного потока по сечению сплошного магнитопровода будет неравномерным. При массивном (сплошном) сердечнике вихревые токи достигают больших значений, нагревают сердечник и, следовательно, возрастают потери энергии. Для ограничения этих вихревых токов увеличивают электрическое сопротивление стального сердечника за счет того, что сердечник обычно

набирается из отдельных, изолированных друг от друга тонких листов электротехнической стали. Толщина листа для машин аппаратов промышленной частоты в 50 Гц выполняется в 0,3–0,5 мм. Для уменьшения проводимости самого ферромагнитного материала добавляется кремниевая присадка, которая сильно увеличивает электрическое сопротивление материала сердечника и мало влияет на магнитные свойства.

Мощность потерь от вихревых токов может быть выражена экспериментальной формулой:

$$P_e = \sigma_e f^2 B_m^2 \gamma G,$$

где  $G$  - вес сердечника;  $\sigma_e$  - коэффициент вихревых токов (зависит от сорта стали и размеров листа);  $\gamma$  - удельная проводимость.

Таким образом, потери в стальном сердечнике  $P_{cm}$  складываются из потерь на гистерезис и на вихревые токи:

$$P_{cm} = P_\Gamma + P_e.$$

При расчетах электротехнических устройств для определения потерь в стали применяются справочные таблицы, в которых дается зависимость суммарных потерь в стали от амплитуды магнитной индукции.

## Глава четвертая

### ТРАНСФОРМАТОРЫ

#### 4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трансформатором называется статический (без движущихся частей) электромагнитный аппарат, предназначенный для изменения величины напряжения переменного тока (повышения или понижения) при неизменной частоте.

Впервые простейший трансформатор с разомкнутым сердечником был изобретен и применен П.Н. Яблочковым в 1876 г. для питания электрических свечей. Дальнейшее усовершенствование трансформатора осуществил И.Ф. Усагин, и он демонстрировал его на Второй Петербургской электротехнической выставке в 1882 г.

Передача электрической энергии переменным током высокого напряжения оказалась возможной после создания трансформатора с замкнутой магнитной системой венгерскими электротехниками М. Дери, О. Блати и К. Циперновским в 1885 г.

Генераторы электрических станций вырабатывают электроэнергию напряжением порядка 10-20 кВ. При передаче электрической энергии на большие расстояния для снижения тепловых потерь требуется повышение напряжения с помощью трансформаторов до 35, 110, 220, 500, 750 и до 1150 кВ.

В местах потребления электроэнергии напряжение должно быть понижено с помощью трансформаторов до такого значения, которое является номинальным для электроприемников 220, 380 В и т.д.

Область применения трансформаторов весьма широка. Применяются они, кроме использования в электроэнергетике, для электрической сварки, в радио - и телестанциях, при измерении больших токов и напряжений, в системах автоматического управления и т.д.

#### 4.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор (рис. 4.1) состоит из замкнутого стального сердечника, набранного, как отмечали, для уменьшения потерь из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм. На сердечнике расположены, для простого однофазного трансформатора, две обмотки (катушки).

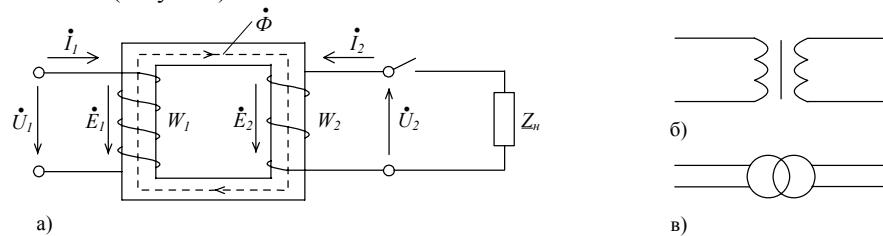


Рис. 4.1. Принципиальная схема трансформатора (а) и его условное изображение на электрических схемах (б, в)

Одна из обмоток, которая называется первичной, включается к сети переменного тока или генератору. Другая обмотка, называемая вторичной, включается к нагрузке  $Z_n$ . Обмотки выполняются из медных проводов, имеющих изоляцию.

Под действием переменного напряжения  $u_1$  в первичной обмотке возникает ток  $i_1$ , и под действием намагничивающего действия этого тока в сердечнике возбуждается переменный магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток индуцирует ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  в соответствующих обмотках трансформатора:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{и} \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4.1)$$

где  $W_1$ ,  $W_2$  - число витков первичной и вторичной обмоток;  $\frac{d\Phi}{dt}$  - скорость изменения магнитного потока.

Действующие значения этих ЭДС можно выразить:

$$E_1 = 4,44 f W_1 \Phi_m \quad \text{и} \quad E_2 = 4,44 f W_2 \Phi_m.$$

Отношение ЭДС первичной обмотки  $E_1$  к ЭДС вторичной обмотки  $E_2$  называется коэффициентом трансформации трансформатора:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (4.2)$$

Согласно этой формуле, коэффициент трансформации можно определить еще как отношение числа витков первичной обмотки  $W_1$  к числу витков вторичной обмотки  $W_2$ . Величина ЭДС фактически определяет величину напряжения, особенно, если не учитывать весьма малые значения падений напряжений на активном  $r$  и индуктивном  $X_p$  сопротивлениях обмотки.

Коэффициент трансформации показывает, во сколько раз с помощью данного трансформатора можно изменить (повышать или понижать) напряжение переменного тока.

Формулу (4.2) с определенной точностью в зависимости от режима работы можно выразить через первичные  $U_1$  и вторичные  $U_2$  напряжения:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (4.3)$$

Если надо повышать напряжение, то число витков вторичной обмотки должно быть больше числа витков первичной обмотки ( $W_2 > W_1$  и  $K > 1$ ). Такой трансформатор называется повышающим. Если необходимо понизить напряжение, то  $W_2 < W_1$  и  $K < 1$ , трансформатор называется понижающим.

Таким образом, при подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока на зажимах вторичной обмотки индуцируется

переменная ЭДС  $E_2$ , и вторичная обмотка становится источником питания, к которой можно включить электроприемник.

При изучении трансформатора обычно рассматривают его режимы работы: холостого хода, короткого замыкания, нагрузки. Из них два режима холостого хода и короткого замыкания являются опытными, выполняя их, определяют некоторые параметры трансформатора.

#### 4.3. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим, когда первичная обмотка включена на номинальное напряжение, а вторичная - разомкнута (рис. 4.2).

При разомкнутой вторичной обмотке, естественно, ток во вторичной обмотке отсутствует и  $\dot{I}_2 = 0$ . А ток первичной обмотки  $\dot{I}_{10}$  называется током холостого хода. Под действием этого тока сердечник намагничивается, и переменный магнитный поток  $\Phi$ , как и отмечено выше, наводит в обмотках ЭДС индукции  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$ .

Величина тока холостого хода  $I_{10}$  обычно мала, достигает порядка 3–10% номинального тока первичной обмотки. Ввиду малой величины этого тока падение напряжения на самой обмотке незначительно и составляет 1–2% подведенного напряжения  $\dot{U}_1$ . Следовательно, напряжение первичной обмотки  $\dot{U}_1$  и ЭДС в этой обмотке  $\dot{E}_1$  весьма близки по величине, т.е.  $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$ .

Вольтметр, включаемый во вторичную обмотку, фактически измеряет ЭДС  $E_2$ , т.е.  $E_2 = U_2$ . Поэтому из опыта холостого хода, по показаниям вольтметров определяют коэффициент трансформации трансформатора:

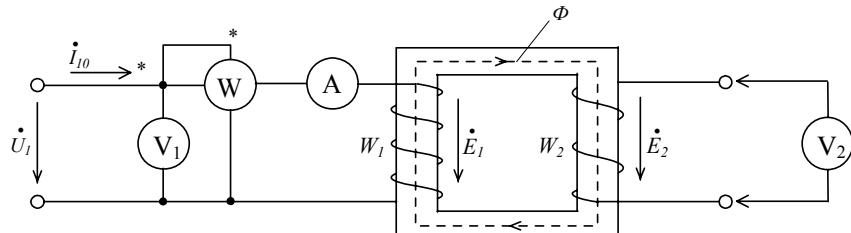


Рис. 4.2. Схема холостого хода трансформатора

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}}, \quad (4.4)$$

где  $U_{10}$ ,  $U_{20}$  - соответственно напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе.

Если известны напряжение  $U_1$  и сечение  $S$  сердечника, то можно ориентировочно определить число витков обмоток трансформатора.

Так как:

$$U_{20} = E_2 = 4,44 f W_2 \Phi_m = 4,44 f W_2 B_m S, \text{ то}$$

$$W_2 = \frac{U_{20}}{4,44 f S B_m}.$$

Амплитуда магнитной индукции выбирается так, чтобы целесообразнее использовать материал сердечника. Наиболее оптимальным считается  $B_m = 1 \div 1,4$  Тл.

Мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе, складывается из потерь мощности в стали (в стальном сердечнике) и потерь мощности в проводах лишь первичной обмотки  $r_1 I_{10}^2$ .

Потери в проводниках обмотки даже полностью нагруженного трансформатора составляют 0,5 – 3% от номинальной мощности трансформатора  $P_h$  (тем меньше, чем мощнее трансформатор). А при холостом ходе ток весьма мал по сравнению с номинальным  $I_{10} \ll I_1$ , поэтому потери мощности в проводах ничтожно малы по сравнению с потерями в стали (исключение составляют лишь трансформаторы, номинальная мощность которых меньше 1000 ВА). Поэтому опыт холостого хода служит также для определения мощности потерь в магнитопроводе, т.е. в стальном сердечнике трансформатора  $P_{cm}$ . Мощность потерь в трансформаторе при холостом ходе составляет 1,4 – 1,9% при полной мощности его в 5 – 50 кВА и 0,5 – 0,3% - при полной мощности 1-10 МВА.

Ток холостого хода  $I_{10}$ , как и ток катушки со стальным сердечником, состоит из реактивной  $I_{1p(L)}$  и активной  $I_{10a}$  составляющих. Реактивная составляющая  $I_{1p(L)}$  обеспечивает намагничивание сердечника, а  $I_{10a}$  активная составляющая обусловлена потерями в стали от гистерезиса и вихревых токов.

Обычно активная составляющая намного меньше реактивной составляющей и соотношение между ними может быть определено равенством  $I_{10a} = 0,1 I_{1p(L)}$ , поэтому можно считать, что ток холостого хода

в основном индуктивного характера и он отстает по фазе от первичного напряжения на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Уравнение электрического состояния трансформатора при холостом ходе фактически не отличается от уравнения катушки со стальным сердечником:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_{10} + jX_{1p} \dot{I}_{10} \text{ или} \\ \dot{U}_1 &= \dot{U}'_1 + r_1 \dot{I}_{10} + jX_{1p} \dot{I}_{10} = \dot{U}'_1 + \underline{Z}_1 \dot{I}_{10},\end{aligned}$$

где  $\underline{Z}_1$  - полное внутреннее сопротивление первичной обмотки.

Принцип построения этой диаграммы также не отличается от построения векторной диаграммы катушки со стальным сердечником.

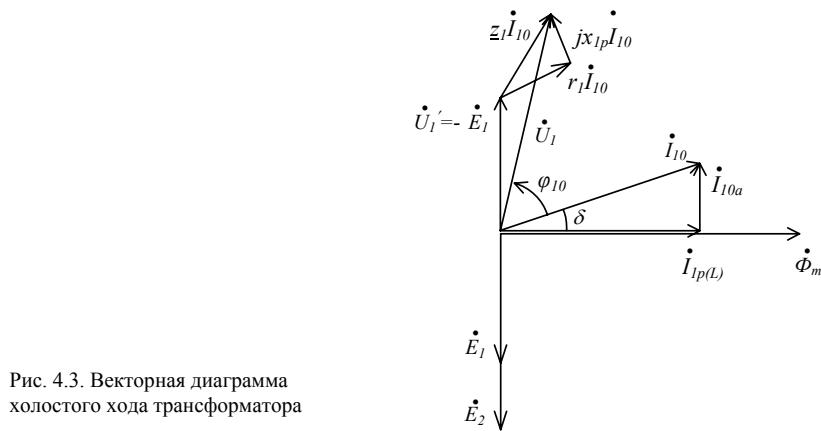


Рис. 4.3. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

#### 4.4. РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

В условиях эксплуатации трансформатора режим короткого замыкания является аварийным режимом. Этот режим выполняется при заводских испытаниях трансформатора в качестве опыта, как и опыт холостого хода, и служит для определения некоторых параметров трансформатора, в частности напряжения короткого замыкания, сопротивлений короткого замыкания и активной мощности короткого

замыкания, называемой потерей мощности на нагрев медных проводов обмотки.

Опыт короткого замыкания трансформатора проводится при короткозамкнутой цепи вторичной обмотки (рис. 4.4). С целью обеспечения безопасности и уменьшения тока короткого замыкания первичную обмотку включают на пониженное напряжение. Величина этого напряжения, называемого напряжением короткого замыкания  $U_{1k}$ , определяется равенством  $I_{1k} = I_{1nom}$ , т.е. равенством значений тока короткого замыкания  $I_{1k}$  и номинального тока  $I_{1nom}$  первичной обмотки.

Напряжение короткого замыкания  $U_{1k}$  составляет 5 – 10% от номинального напряжения  $U_{1nom}$  и его можно выразить:

$$U_{1k} = Z_k I_{1nom} = \sqrt{r_k^2 + X_k^2} \cdot I_{1nom},$$

где  $Z_k$ ,  $r_k$ ,  $X_k$  – полное, активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания.

При коротком замыкании ЭДС вторичной обмотки  $E_{2k}$  составляет лишь 2 – 5% от величины ЭДС  $E_2$  рабочего режима. Пропорционально значению ЭДС уменьшается магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике и мощность потерь в стали сердечника. Следовательно, считают, что мощность, потребляемая трансформатором при коротком замыкании, затрачивается на нагрев проводов первичной и вторичной обмоток, т.е.

$$P_k = r_1 I_{1k}^2 + r_2 I_{2k}^2 = r_k I_{1nom}^2.$$

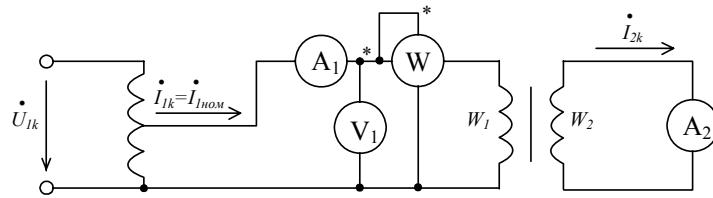


Рис. 4.4. Схема опыта короткого замыкания

Потери мощности при коротком замыкании  $P_k$  иногда называются потерей в меди, т.к. она идет на нагрев медных проводов обмоток и обозначается  $P_M$ .

#### 4.5. РЕЖИМ НАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Рабочим режимом трансформатора является его нагрузочный режим. В этом случае первичная обмотка трансформатора включается к сети с номинальным напряжением  $U_1$ , а к зажимам вторичной обмотки включается нагрузка с сопротивлением  $Z_h$  (рис. 4.5).

В режиме холостого хода, как известно, основной магнитный поток в сердечнике  $\Phi$  создает в первичной и вторичной обмотках ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . При включении нагрузки под влиянием  $E_2$  во вторичной обмотке трансформатора пойдет ток  $I_2$ , который по закону Ленца создает в сердечнике свой магнитный поток  $\Phi_2$ , размагничивающий сердечник. В результате этого магнитный поток в сердечнике должен уменьшаться, и это приведет уменьшению ЭДС  $E_1$  в первичной обмотке. При холостом ходе существовало равновесие напряжения  $U_1$  и ЭДС  $E_1$ . Теперь часть приложенного напряжения  $U_1$  окажется неуравновешенной, что приведет к увеличению тока в первичной обмотке  $I_1$ . Этот ток  $I_1$  будет возрастать до тех пор, пока не компенсирует размагничивающее действие потока  $\Phi_2$  и не восстановит первоначальное значение магнитного потока  $\Phi$ , который был при холостом ходе. Тогда восстановится и равновесие между ЭДС  $E_1$  и напряжением  $U_1$ .

Неизменность магнитного потока при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки является важнейшим свойством трансформатора. Из постоянства магнитного потока следует закон равновесия намагничивающих сил в трансформаторе:

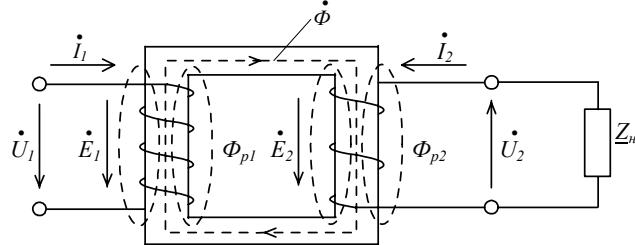


Рис. 4.5. Схема трансформатора при режиме нагрузки

$$W_1 \dot{I}_{10} = W_1 \dot{I}_1 + W_2 \dot{I}_2, \quad (4.5)$$

где  $W_1 \dot{I}_{10}$  - намагничивающая сила, создаваемая первичной обмоткой при холостом ходе;

$W_1 \dot{I}_1$  и  $W_2 \dot{I}_2$  - намагничающие силы первичной и вторичной обмоток при нагрузке.

Разделив все члены равенства (4.5) на  $W_1$ , получим:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{10} &= \dot{I}_1 + \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 \quad \text{или} \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} - \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2.\end{aligned}\quad (4.6)$$

Обозначим

$$\dot{I}'_2 = -\frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 \quad (4.7)$$

и  $\dot{I}'_2$  назовем приведенным вторичным током. Он является нагрузочной составляющей тока первичной обмотки, которая компенсирует размагничающее действие вторичного тока  $\dot{I}_2$ , т.е. за счет этого тока магнитный поток увеличивается и восстанавливает свое прежнее значение.

В этом еще можно убедиться, если умножить обе части равенства (4.7) на  $W_1$ , то получим  $W_1 \dot{I}'_2 = -W_2 \dot{I}_2$ , т.е. намагничающая сила, вызываемая током  $\dot{I}'_2$  в первичной обмотке, равна по величине и противоположна по фазе намагничающей силе, вызываемой размагничающим током  $\dot{I}_2$  во вторичной обмотке, что приводит к неизменности магнитного потока трансформатора.

Таким образом, на основе равенств (4.6) и (4.7) следует, что ток первичной обмотки  $\dot{I}_1$  равен геометрической сумме двух составляющих: одна из них  $\dot{I}_{10}$  обеспечивает создание основного потока  $\Phi$  в сердечнике, а другая  $(-\dot{I}'_2)$  компенсирует размагничающее действие вторичного тока  $\dot{I}_2$ :

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}'_2. \quad (4.8)$$

Если пренебречь током холостого хода  $\dot{I}_{10}$ , имеющим малое значение по сравнению с нагрузочным током, то получим приближенное равенство численных значений токов:

$$I_1 \approx I'_2 \quad \text{или} \quad I_1 \approx \frac{W_2}{W_1} I_2, \quad \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{W_2}{W_1}.$$

Ввиду пропорциональности чисел витков соответствующим напряжениям можно представить:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \text{ или } I_1 U_1 \approx I_2 U_2,$$

а последнее показывает, что полная мощность первичной цепи  $S_1 = U_1 I_1$  и полная мощность вторичной цепи  $S_2 = U_2 I_2$  трансформатора приблизительно одинаковы, т.е. потери в самом трансформаторе могут быть весьма малыми и КПД трансформатора достаточно высоким.

Токи первичной и вторичной обмоток  $I_1$  и  $I_2$  создают небольшие, относительно основного потока  $\Phi$ , потоки рассеяния  $\Phi_{pl}$  и  $\Phi_{p2}$ , которые совпадают по фазе с соответствующими токами. Эти потоки рассеяния в свою очередь возбуждают ЭДС рассеяния, которых можно заменить падением напряжений на индуктивных сопротивлениях рассеяния:

$$\dot{E}_{1p} = -jX_{1p} \dot{I}_1 \quad \text{и} \quad \dot{E}_{2p} = -jX_{2p} \dot{I}_2.$$

Учитывая еще активные сопротивления обмоток  $r_1$  и  $r_2$ , можно написать уравнения электрического состояния трансформатора при режиме нагрузки:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jX_{1p} \dot{I}_1 + r_1 \dot{I}_1, \quad (4.9)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + jX_{2p} \dot{I}_2 + r_2 \dot{I}_2. \quad (4.10)$$

На основе этих уравнений можно построить векторную диаграмму нагруженного трансформатора (рис. 4.6), где наглядно показываются соотношения его первичных и вторичных напряжений и токов. Построение диаграммы целесообразно начинать с вектора амплитуды основного, рабочего магнитного потока  $\dot{\Phi}_m$ . Вектор тока холостого хода  $\dot{I}_{10}$  опережает вектор  $\dot{\Phi}_m$  на угол магнитных потерь  $\delta$ . Вектора ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  отстают по фазе от вектора  $\dot{\Phi}_m$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Для случая активно-индуктивной нагрузки  $Z_h = r_h + jX_h$  вектор тока  $\dot{I}_2$  нужно откладывать к вектору  $\dot{E}_2$  под углом:

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{X_2 + X_h}{r_2 + r_h}.$$

Вектор  $\dot{U}_2$  надо построить так, чтобы векторное сложение напряжений  $\dot{U}_2$ ,  $r_2 \dot{I}_2$  и  $jX_{2p} \dot{I}_2$  было равно суммарному вектору  $\dot{E}_2$ .

Для этого вектор напряжения  $\dot{U}_2$  необходимо провести к вектору тока  $\dot{I}_2$  под углом:  $\varphi_2 = \arctg \frac{X_h}{r_h}$ .

Далее, с конца вектора  $\dot{U}_2$  проводят вектор напряжения на активном сопротивлении  $r_2 \dot{I}_2$  в направлении, параллельном с вектором тока  $\dot{I}_2$ , затем перпендикулярно проводят вектор индуктивного напряжения  $jX_{2p} \dot{I}_2$  и притом так, чтобы он замыкался на конце суммарного вектора  $\dot{E}_2$ .

Вектор первичного тока  $\dot{I}_1$  следует построить как векторную сумму тока холостого хода  $\dot{I}_{10}$  и приведенного вторичного тока:

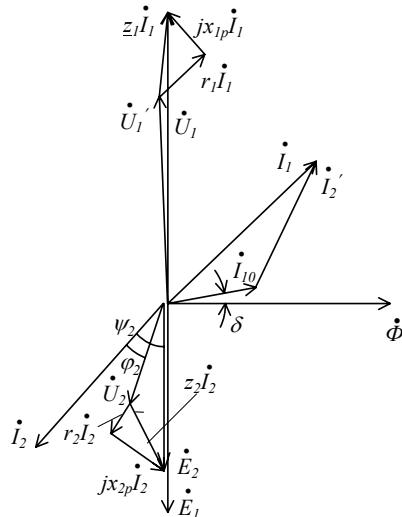


Рис. 4.6. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

$$\dot{I}'_2 = -\frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2.$$

Наконец, вектор первичного напряжения  $\dot{U}_1$  строим так же, как на диаграмме холостого хода, согласно уравнению:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_1 + r_1 \dot{I}_1 + jX_{1p} \dot{I}_1.$$

#### 4.6. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

При передаче электроэнергии величина собственного потребления активной мощности трансформатором считается потерей в трансформаторе. Отношение отдаваемой трансформатором мощности  $P_2$  к получаемой мощности  $P_1$  называется коэффициентом полезного действия трансформатора, и он равен:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ или } \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%.$$

КПД, особенно мощных трансформаторов, очень высок, достигает 99% и даже выше. Объясняется это и тем, что трансформатор не имеет движущихся частей, следовательно, не имеет механических потерь.

Общие потери в трансформаторе равны:

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

и они складываются из потерь в стали сердечника  $P_{cm}$  и потерь в меди (в обмотках)  $P_m$ :

$$\Delta P = P_{cm} + P_m.$$

Потери в стали  $P_{cm}$  и потери в меди определяются, как отмечали в §§4.3 и 4.4, экспериментально. Потери в стали при  $U_1 = const$  - величина постоянная и не зависит от тока нагрузки. А потери мощности на нагрев обмоток (потери в меди)  $P_m = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$  увеличиваются с увеличением тока нагрузки  $I_2$ . Поэтому при больших нагрузках наблюдается сильное увеличение потерь меди, так как они растут пропорционально квадрату тока и КПД трансформатора уменьшается.

В режиме холостого хода  $P_2 = 0$  и  $\eta = 0$ . Далее, с ростом отдаваемой мощности  $P_2$  КПД растет и достигает некоторого максимального значения, при больших нагрузочных токах, как отмечено выше, КПД начинает уменьшаться. КПД, естественно, зависит и от коэффициента мощности нагрузки. С увеличением  $\cos \varphi_2$  КПД

увеличивается. При  $\cos\varphi_2 > 0,8$  и номинальном напряжении  $U_1 = U_{1\text{ном}}$  и номинальном токе  $I_1 = I_{1\text{ном}}$ , КПД мощных трансформаторов достаточно высок, он зависит и от коэффициента загрузки, равного отношению вторичного тока к номинальному значению этого тока  $K_3 = \frac{I_2}{I_{2\text{н}}}$ .

Максимум КПД при максимальной загрузке ( $K_3 = 1$ ) имеет место при равенстве потерь стали и потерь меди  $P_{cm} = P_m$ .

В реальности трансформаторы не всегда загружаются полностью, поэтому при проектировании обычно рассчитывают так, чтобы максимум КПД соответствовал их средней нагрузке, которая определяется величиной коэффициента загрузки  $K_3 = 0,7 \div 0,5$ .

Габаритные размеры трансформаторов при данной частоте определяются в основном номинальными величинами напряжения и тока. Заданное номинальное значение тока определяет сечение обмотки. А номинальное напряжение, согласно уравнения трансформаторной ЭДС, определяет величину магнитного потока и, следовательно, размеры сердечника. Поэтому в паспортах трансформаторов как одну из основных величин указывают их полную мощность:

$$S_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}} \cdot I_{1\text{ном}}.$$

#### 4.7. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки  $U_2 = f(I_2)$  при постоянных значениях первичного напряжения  $U_1$  и коэффициента мощности нагрузки  $\cos\varphi_2$ . Из уравнения (4.10) получим :

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \underline{Z}_2 \dot{I}_2. \quad (4.11)$$

При обычной активно-индуктивной нагрузке напряжение  $U_2$  уменьшается с ростом тока  $I_2$  (рис. 4.7).

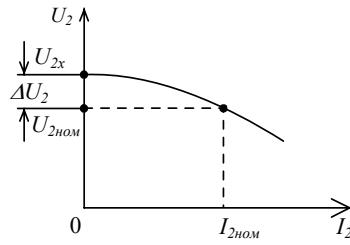


Рис. 4.7. Внешняя характеристика трансформатора

У силовых трансформаторов при номинальном токе  $I_{2\text{ном}}$  отношение  $\frac{\Delta U_2}{U_{2x}}$  имеет порядок 5 – 10%, где  $U_{2x}$  – вторичное напряжение при холостом ходе.

Трансформаторы проектируют так, чтобы напряжение холостого хода  $U_{2x}$  было на 5% больше номинального напряжения его приемников.

#### 4.8. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

##### 4.8.1. Форма сердечника. Способы соединения обмоток

Передачу электроэнергии трехфазного тока можно осуществить тремя однофазными трансформаторами.

Вместо группы из трех однофазных трансформаторов в большинстве случаев применяется один трехфазный трансформатор. Трехфазный трансформатор изобретен в 1889 году русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским. Он по сравнению с группой однофазных трансформаторов имеет меньшие габариты и дешевле. Возможность уменьшения веса и размеров сердечника трехфазного трансформатора в сравнении с общей массой сердечников трех однофазных трансформаторов объясняется тем, что стержень, служащий для прохождения общего магнитного потока в трехфазном трансформаторе, исключается.

На рис. 4.8 дается группа из трех однофазных трансформаторов.

Рассмотрим образование магнитных потоков в режиме холостого хода трансформаторов, т.е. при включении к трехфазной сети обмоток, например, только высших напряжений. Под действием намагничивающих сил токов этих обмоток в сердечнике возбуждаются магнитные потоки отдельных фаз  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$ . Если конструктивно объединить стержни свободные от обмоток в один, то по нему должен проходить общий магнитный поток, являющийся суммой потоков фаз. При наличии симметричной трехфазной системы, как обычно бывает, суммарный поток равняется нулю и необходимость в наличии четвертого или общего стержня отпадает.

Рис. 4.8. Схема образования магнитных потоков в сердечниках трех однофазных трансформаторов

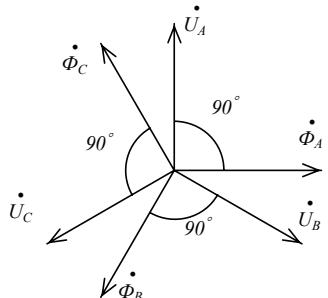
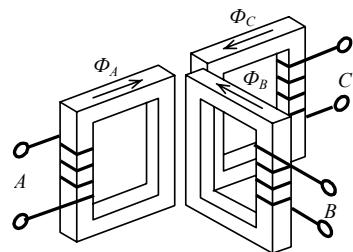


Рис. 4.9. Векторная диаграмма фазных напряжений и магнитных потоков трехфазного трансформатора

Векторная диаграмма фазных напряжений и магнитных потоков приведена на рис. 4.9. Симметричные фазные напряжения  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  одинаковы по величине и сдвинуты по фазе на угол  $120^\circ$ . Векторы магнитных потоков отстают от соответствующих напряжений на угол  $90^\circ$  и образуют симметричную звезду, и сумма их равна нулю.

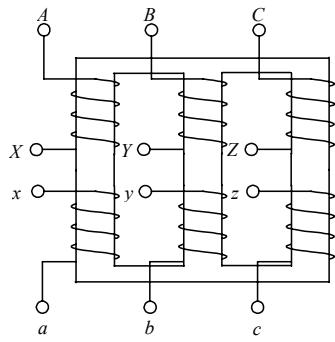
Следовательно, сердечник трехфазного трансформатора выполняется трехстержневым, на каждом из стержней располагаются обмотки высших и низших фазных напряжений (рис. 4.10).

Концы обмоток трехфазного трансформатора размечаются так же, как и указано выше для группы однофазных трансформаторов.

На один из стержней каждого сердечника намотаны обмотки высшего и низшего напряжений каждой фазы.

Зажимы обмоток трансформаторов различаются в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения  $A$ ,  $B$ ,  $C$  - начала обмоток и  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  - их концы; на стороне низшего напряжения - соответственно  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - начала и  $x$ ,  $y$ ,  $z$  - концы.

Как первичные, так и вторичные обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схеме звезда или треугольник. Соответственно, эти два вида соединения обозначаются символами  $Y$  и  $\Delta$ .



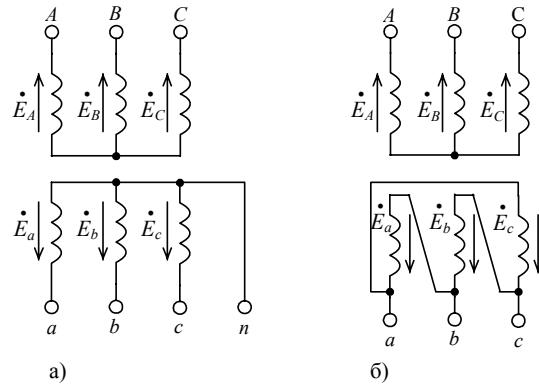
Например, символ  $Y/\Delta$  означает, что первичные обмотки соединены звездой, а вторичные - треугольником. Такое соединение является наиболее распространенным для трансформаторов большой мощности и применяется в тех случаях, когда на стороне низшего напряжения не нужен нейтральный провод.

Соединение обеих обмоток трехфазного трансформатора по схеме звезды является наиболее простым и дешевым. В этом случае каждая из обмоток и ее изоляция могут быть рассчитаны на фазное напряжение и линейный ток.

Различие способов соединений определяется различием так называемых групп соединений. Группа соединений определяется углом сдвига фаз между векторами линейных напряжений обмоток высшего и низшего напряжений, и она учитывается при соединении трансформаторов для их параллельной работы. При определении группы соединений трансформатора первичным напряжением считается его высшее напряжение, а вторичным - низшее напряжение. Наиболее часто применяются две группы соединения обмоток: звезда/треугольник ( $Y/\Delta$ ), звезда с выведенной нейтральной точкой/треугольник ( $Y_0/\Delta$ ) и звезда/звезда с выведенной нейтральной точкой ( $Y/Y_0$ ).

На рис. 4.11 даны схемы соединений  $Y/Y_0$  и  $Y/\Delta$ .

Каждая группа соединений характеризуется не только схемой, но и



цифрами, например  $Y/\Delta$  - 11,  $Y/Y_0$  - 12. Числа 11 и 12 показывают угловое смещение векторов высшего и низшего напряжений. Оно соответствует углу сдвига в сторону вращения стрелки часов между векторами линейных напряжений первичной и вторичной обмоток, принимая за единицу угла угол в  $30^\circ$ . Так, при угле сдвига в  $330^\circ$  группа соединения будет  $\frac{330}{30} = 11$ , а при угле сдвига в  $360^\circ$  - она равна  $\frac{360}{30} = 12$ .

В последнем случае вектора линейных напряжений обмоток высшего и низшего напряжений совпадают по направлению, т.е. угловое смещение между этими векторами равно 0, поэтому данная группа обозначается еще цифрой 0.

#### 4.8.2 Устройство и охлаждение трехфазного трансформатора

Обмотка трансформатора выполняется из изолированной круглой или прямоугольной меди. На стержень магнитопровода надевают изолирующий (обычно картонный, пропитанный бакелитовым лаком) цилиндр, на котором помещают обмотку низшего напряжения. На обмотку низшего напряжения надевают изолирующий цилиндр, на который помещают обмотку высшего напряжения. Такое расположение обмотки удобно тем, что при неисправностях, которые чаще случаются в высоковольтной обмотке, она доступна для осмотра и ремонта.

Потери энергии в трансформаторе относительно малы, но величина их в мощных трансформаторах весьма значительна, поэтому важной задачей при конструировании трансформаторов является отвод тепла, выделяющегося в обмотках и сердечнике трансформатора. Известно, что длительное повышение температуры вызывает необратимое ухудшение изоляционных и механических свойств диэлектрических материалов - старение изоляции.

Для охлаждения трансформатора применяются различные способы: естественное воздушное, масляное, масляное охлаждение с дутьем, масляное охлаждение с принудительной циркуляцией масла. Воздушное охлаждение применяется в трансформаторах малой мощности.

Широко используются масляные трехфазные трансформаторы с естественным воздушным охлаждением. В таких трансформаторах сердечник с обмотками помещается в стальной бак с минеральным трансформаторным маслом, обладающим большой электрической прочностью.

Масло обеспечивает хорошую изоляцию витков обмотки и эффективный теплоотвод в окружающую среду при его циркуляции. Для улучшения теплоотдачи поверхность бака делается ребристой или с

циркуляционными трубами, сообщающимися с верхней и нижней частями конструкции. На крышке бака трансформатора размещаются проходные изоляторы, через которые концы обмоток трансформатора выводятся наружу. Для сбора масла при его расширении на кожухе устанавливается бачок. Трансформаторы с напряжением 35 кВ и выше, а также частично и трансформаторы с напряжением 6 и 10 кВ устанавливаются преимущественно вне помещений на открытом воздухе, и поэтому проходные изоляторы у таких трансформаторов имеют ребристую поверхность, чтобы обеспечить надежность в работе во время атмосферных осадков.

#### 4.9. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

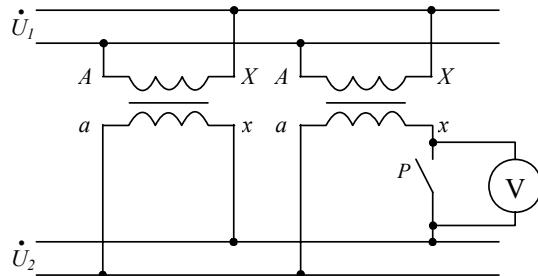
С целью обеспечения надежности в электроснабжении возникает необходимость параллельного включения трансформаторов. В этом случае первичные обмотки подключаются к общей питающей сети, а вторичные - к линии потребления (рис. 4.12).

Трансформаторы, включаемые на параллельную работу, должны удовлетворять трем следующим условиям:

- 1) равенство коэффициентов трансформации;
- 2) одинаковые напряжения короткого замыкания (допускается отклонение  $\pm 10\%$ );
- 3) одна и та же группа соединений (в случае трехфазных трансформаторов).

Первичные напряжения этих трансформаторов одинаковы, т.к. они включаются к одной и той же питающей сети. А равенство коэффициентов трансформации является условием равенства ЭДС на концах вторичных обмоток, что в свою очередь исключает нежелательные уравнительные токи в замкнутом контуре вторичных обмоток в режиме холостого хода трансформаторов, включенных параллельно.

Протекающий по обмоткам уравнительный ток нагревает обмотки и снижает коэффициент полезного действия трансформатора. На практике



допускается отклонение значения коэффициентов трансформации трансформаторов, включенных параллельно на 0,5%.

Для контроля равенства ЭДС вторичных обмоток и соответствия «начала» и «конца» этих обмоток при включении на линию нагрузки служит показанный на схеме вольтметр. Рубильник  $P$  может быть включен только в том случае, если этот контрольный вольтметр показывает нуль, что соответствует выполнению сформулированного выше условия.

Второе условие (одинаковость напряжения короткого замыкания) необходимо для того, чтобы при включении нагрузки последняя распределялась между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. По отношению к внешней цепи ЭДС вторичных обмоток трансформаторов, включенных параллельно, действуют согласно, т.е. совпадают по условно-положительным направлениям. При этом ток нагрузки будет распределяться между отдельными трансформаторами обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания  $Z_k$ . При равенстве напряжений короткого замыкания распределение тока нагрузки между трансформаторами будет происходить пропорционально их номинальным мощностям.

Если не будет соблюдено третье условие (соответствие групп соединений) при параллельном соединении трехфазных трансформаторов, то между ЭДС трансформаторов появится сдвиг по фазе. А это послужит причиной возникновения результирующей ЭДС в каждом контуре, образуемом двумя фазными обмотками (двух трансформаторов), и появлению больших токов, опасных для обмоток трансформаторов.

#### 4.10. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные трансформаторы применяются для измерения напряжения и тока в цепи высокого напряжения. Непосредственное включение измерительных приборов в цепь высокого напряжения невозможно из-за опасности и недостаточности пределов измерений приборов. Использование измерительных трансформаторов обеспечивает изоляцию измерительных приборов от цепи высокого напряжения и расширение пределов измерения измерительных приборов.

Измерительные трансформаторы подразделяются на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Первые применяются для включения вольтметров, частотометров и обмоток напряжения измерительных приборов ваттметров, счетчиков, фазометров. Трансформаторы тока применяются для включения амперметров и обмоток тока измерительных приборов.

Схема включения трансформатора напряжения показана на рис. 4.13.

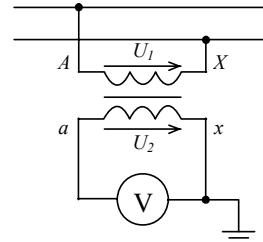
Напряжение  $U_1$  понижается до стандартного значения  $U_2$ , на которое рассчитан вольтметр, например, до 100 В при номинальном напряжении

сети 6000 В. Известно, что сопротивление вольтметра велико, и измерительный трансформатор напряжения практически работает в режиме холостого хода. Из-за незначительности токов падениями напряжений на обмотках трансформатора можно пренебречь и принять напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  соответственно равными ЭДС  $E_1$ ,  $E_2$ . Тогда можно определить высокое напряжение  $U_1$  по показанию вольтметра  $U_2$  и по известному значению коэффициента трансформации  $\kappa$ :

$$U_1 = \kappa U_2.$$

Для безопасности обслуживания вторичная обмотка трансформатора заземляется.

Рис. 4.13. Схема включения трансформатора напряжения



Устройство измерительного трансформатора напряжения мало отличается от устройства обычного силового трансформатора.

Трансформатор тока включается в цепь по схеме, показанной на рис. 4.14.

Через первичную обмотку трансформатора должен проходить ток нагрузки полностью, поэтому эта обмотка последовательно соединяется с нагрузкой  $Z_h$ .

Для правильности включения выводы обмоток трансформатора тока маркируют: первичная -  $\mathcal{L}_1$  и  $\mathcal{L}_2$  (линия), вторичная -  $I_1$  и  $I_2$  (измерительный прибор).

Вторичная обмотка трансформатора замыкается через амперметр или через токовые обмотки ваттметра, счетчика, фазометра, имеющих очень малые сопротивления, составляющие доли Ома. Следовательно, трансформатор тока практически работает в режиме короткого замыкания.

Напряжение вторичной цепи трансформатора тока мало ввиду малости сопротивлений обмоток измерительных приборов. Малому напряжению вторичной цепи соответствует малое значение ЭДС  $E_2$ , а следовательно, и малые значения магнитного потока  $\Phi$  в сердечнике, согласно известному уравнению:  $E_2 = 4,44f W_2 \Phi_m$ .

Для возбуждения этого малого магнитного потока требуется незначительная намагничивающая сила  $W_1 I_{10}$ . Поэтому в уравнении

$$W_1 \dot{I}_1 = (-W_2 \dot{I}_2) + W_{10} \dot{I}_{10}$$

можно практически пренебречь этой намагничивающей силой и считать

$$W_1 \dot{I}_1 = -W_2 \dot{I}_2.$$

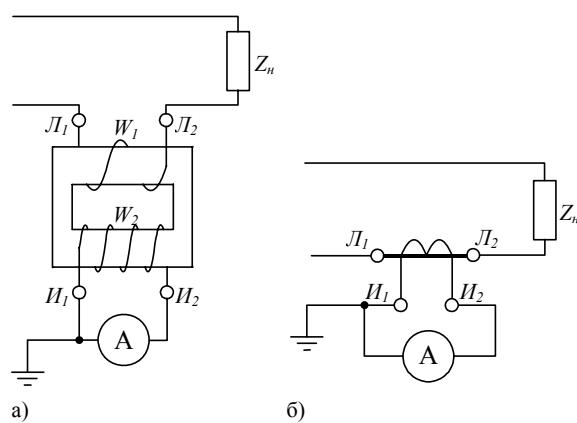
Учитывая численные значения, получим:

$$I_1 = \frac{W_2}{W_1} I_2 = \kappa_I I_2,$$

где  $\kappa_I = \frac{W_2}{W_1}$  - коэффициент трансформации тока.

Таким образом, при посредстве трансформатора тока можно определять ток в цепях высокого напряжения на основе измерения небольшого тока с соблюдением мер безопасности. Стандартные номинальные первичные токи трансформаторов тока бывают от 5 до 15000 А, а номинальный вторичный ток 5 А (у некоторых - 1А).

Рис. 4.14. Схемы включения трансформатора тока (а) принципиальная, (б)



Разрыв вторичной цепи трансформатора тока недопустим и является для него аварийным режимом. При отсутствии вторичного тока поток, создаваемый сильным током первичной обмотки и нескомпенсированный потоком от вторичного тока, возрастает до больших значений. А это приводит к нагреву сердечника, увеличению вторичной ЭДС и напряжения, что может привести к пробою изоляции и представляет опасность для обслуживающего персонала. Для соблюдения техники безопасности вторичная обмотка обычно заземляется.

Трансформаторы тока имеют разные конструктивные оформления. Из переносных трансформаторов тока наиболее удобными в использовании являются измерительные клещи, рис. 4.15.

Они выполняются в виде разъемного сердечника для обхвата провода с измеряемым током, со вторичной обмоткой, замкнутой на амперметр. В этом случае роль одновитковой первичной обмотки выполняет охваченный клещами провод с током. Удобство заключается в измерении тока без разрыва провода, хотя точность измерений невысока. Для более точных измерений широко применяется универсальный трансформатор тока, рис. 4.16.

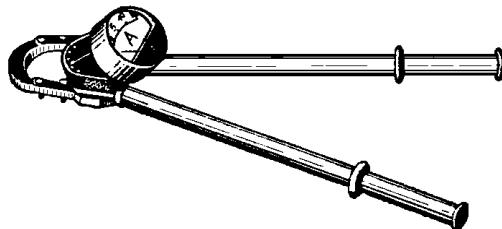


Рис. 4.15. Измерительные клещи

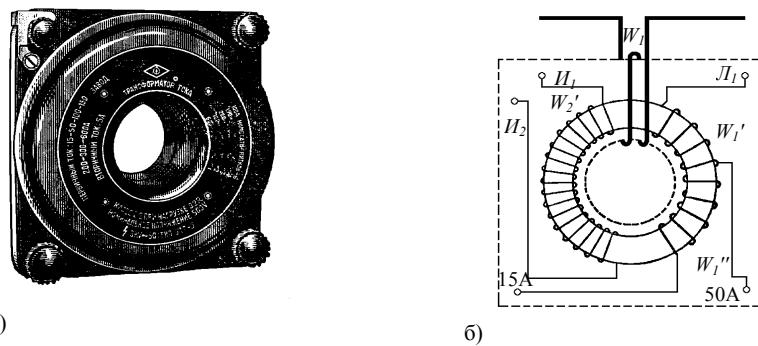
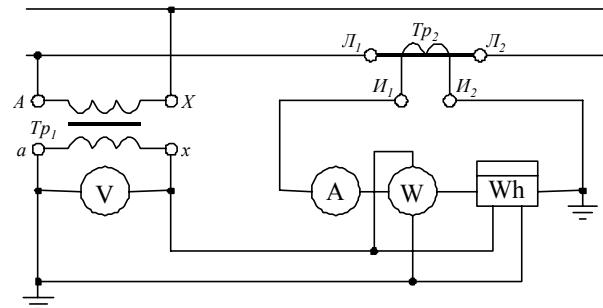


Рис. 4.16. Универсальный трансформатор тока (а) внешний вид, (б) принципиальная схема

Рис. 4.17. Схема включения приборов через измерительные



На рис. 4.17 показано включение в однофазную цепь вольтметра, амперметра, ваттметра и счетчика при помощи трансформатора напряжения  $Tp_1$  и трансформатора тока  $Tp_2$ .

По точности измерительные трансформаторы делятся на классы, которые в основном определяются наибольшей допустимой погрешностью коэффициента трансформации в процентах.

#### 4.11. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В конструктивном отношении имеется большое разнообразие сварочных трансформаторов, которые определяются видом сварки (дуговая,стыковая, шовная, точечная).

Сварочные трансформаторы представляют собой источники переменного тока - это наиболее распространенные установки дуговой сварки. Они представляют собой одно - или трехфазные понижающие трансформаторы для включения в сеть 220 или 380 В со вторичным

напряжением холостого хода 60-75 В, рассчитанные на большие сварочные токи. Ток, получаемый от мощного трансформатора, достигает 1000-1600 А. Поэтому вторичная обмотка сварочного трансформатора, имея малое число витков, выполняется из провода с большим сечением, чаще из медной шины. В зависимости от режима сварки и от размеров свариваемых изделий величина тока должна регулироваться. С такой целью в сварочную цепь включают реактивную катушку или дроссель с регулируемым воздушным зазором магнитопровода. При увеличении воздушного зазора уменьшаются индуктивность и индуктивное сопротивление реактивной катушки, а это увеличивает ток. Сила сварочного тока снижается при уменьшении воздушного зазора.

Для получения качественной сварки требуется устойчивое горение дуги, а последнее обеспечивается, если сварочный ток имеет почти неизменное значение. Для получения такого тока трансформатор должен иметь крутопадающую внешнюю характеристику. Такая характеристика получается, если конструктивно трансформатор выполнен со специально увеличенным потоком рассеяния (увеличена индуктивность рассеяния обмоток). Обмотки трансформатора расположены на стержнях 1 и 2 магнитопровода, рис. 4.18, что увеличивает поток рассеяния.

Ток сварки между электродом 3 и изделием 4 регулируется изменением зазора  $\delta$  между сердечником и якорем дросселя (реактивной катушки) 5. При различных значениях зазора  $\delta$  получаются различные по крутизне падения внешние характеристики, рис. 4.19.

При малых значениях зазора  $\delta$  получается внешняя характеристика большая по крутизне падения. Такая характеристика должна обеспечивать более устойчивое горение дуги, так как одному и тому же изменению напряжения  $\Delta U$  в этом случае соответствует наименьшее изменение тока  $\Delta I_3$ .

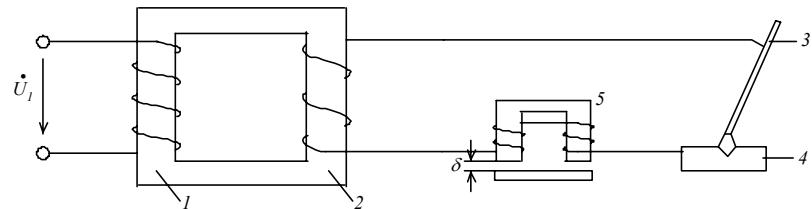
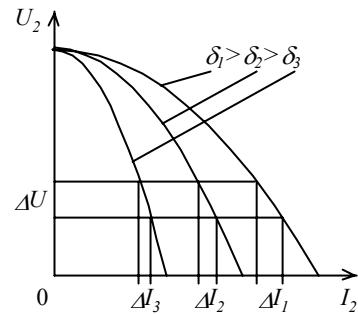


Рис. 4.18. Принципиальная схема сварочного трансформатора

Рис. 4.19. Внешние характеристики сварочного трансформатора в зависимости от величины зазора  $\delta$



В некоторых типах сварочных трансформаторов регулирование тока производится изменением индуктивной связи между первичными и вторичными обмотками. Трансформаторы такого типа имеют стержневой магнитопровод с подвижными вторичными обмотками и силу сварочного тока регулируют изменением расстояния между первичными и вторичными обмотками.

При раздвижении обмоток магнитная связь между ними уменьшается, а потоки рассеяния и индуктивное сопротивление обмоток увеличиваются, следовательно, ток уменьшается. При сближении обмоток ток увеличивается. Каждому положению вторичных обмоток соответствует своя внешняя характеристика.

В других типах трансформаторов повышенное рассеяние потока создается за счет магнитных шунтов, представляющих собой подвижные средние стержни (пакеты), встроенные в стержневые магнитопроводы трансформаторов. Обмотки располагаются на крайних стержнях. При перемещении магнитного шунта изменяется магнитная связь между обмотками (за счет шунтирования части магнитного потока), а следовательно, индуктивное сопротивление обмоток и крутизна внешней характеристики.

#### 4.12. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформатор позволяет получить регулируемое вторичное напряжение. Он отличается от рассмотренных трансформаторов тем, что его обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения. Поэтому обмотки имеют не только магнитную, но и электрическую связь. Схема понижающего автотрансформатора изображена на рис. 4.20.

Для автотрансформатора можно записать уравнение магнитного состояния:

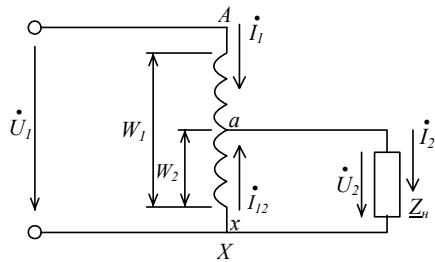


Рис. 4.20. Электрическая схема автотрансформатора

$$W_1 \dot{I}_{10} = (W_1 - W_2) \dot{I}_1 + W_2 \dot{I}_{12},$$

где  $\dot{I}_{10}$  - ток холостого хода, он протекает при отключенной нагрузке через всю обмотку с числом  $W_1$ ;

$\dot{I}_1$  - ток на участке  $Aa$ , имеющем  $W_1 - W_2$  витков;

$\dot{I}_{12}$  - ток на участке  $ax$ , имеющем  $W_2$  витков.

Ток  $\dot{I}_{12}$  складывается из токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , отличающихся по фазе почти на  $180^\circ$ . Ввиду малости тока холостого хода  $I_{10}$  величиной  $W_1 \dot{I}_{10}$  практически можно пренебречь, тогда получим:

$$(W_2 - W_1) \dot{I}_1 = W_2 \dot{I}_{12}$$

Разделив обе части равенства на  $W_2$ , имеем:

$$\left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right) \dot{I}_1 = \dot{I}_{12}$$

Из полученного выражения видно, что чем ближе коэффициент трансформации  $\kappa = \frac{W_1}{W_2}$  к единице, тем меньше ток  $I_{12}$ . Следовательно, у автотрансформаторов, где число витков  $W_1$  близко к числу витков  $W_2$ , ток  $I_{12}$ , занимающий большую часть от всей обмотки, будет по величине незначительным. Это позволяет выполнить общую часть обмотки из провода меньшего сечения, чем сечение вторичной обмотки обычного трансформатора. В результате уменьшается объем меди, это в свою очередь позволяет уменьшить габариты и массу магнитопровода.

Таким образом, чем меньше различаются числа витков  $W_1$  и  $W_2$ , тем выгоднее применение автотрансформаторов. Преимущества автотрансформатора уменьшаются с увеличением коэффициента трансформации.

В лабораториях широкое применение находят автотрансформаторы низкого напряжения (ЛАТРы), имеющие плавную регулировку выходного напряжения.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

### 5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

#### **электроизмерительных приборов**

Для контроля за режимом работы электрических установок применяют различные электроизмерительные приборы. Эти приборы измеряют напряжение, ток, мощность, частоту, сопротивление, расход электрической энергии и т.д.

Приборы для электрических измерений отличаются высокой чувствительностью, точностью, простотой и надежностью. Благодаря этим качествам, электроизмерительные приборы используются и для измерения неэлектрических величин (температуры, величины деформации тел, толщины изделий и т.д.), контроля и автоматизации некоторых производственных процессов и при проведении экспериментальных исследований.

Электроизмерительные приборы классифицируют по следующим признакам.

1) По виду измеряемой величины, когда классификация производится по наименованию единицы измеряемой величины. А прибор обозначается начальной буквой единицы измеряемой величины.

2) По роду тока. Эта классификация позволяет определить, в цепях какого тока, постоянного, переменного (однофазного или трехфазного), можно применить данный прибор.

3) По физическому принципу действия измерительного механизма приборы делятся на: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, тепловые, электростатические, электронные и т.д.

4) По степени точности приборы делятся на восемь классов точности. А класс точности прибора обозначают цифрой, равной допускаемой приведенной погрешности, выраженной в процентах. Приборы бывают следующих классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Для счетчиков электрической энергии класс точности следующий: 0,5; 1,0; 2,0; 2,5. Приборы классов точности 0,05 и 0,1 считаются контрольными; 0,2 и 0,5 - лабораторными; 1, 1,5 и 2,5 - техническими и 4 - учебными.

5) По исполнению в зависимости от условий эксплуатации. Эта классификация определяется пятью группами  $A, B, B_1, B_2, B_3$  по диапазону рабочих температур и относительной влажности.

6) По степени защиты от внешних магнитных и электрических полей приборы делятся на категории I и II. От воздействия внешних полей приборы защищают экранированием измерительного механизма.

7) По устойчивости к механическим воздействиям приборы подразделяют на группы в зависимости от значения максимального ускорения при тряске или вибрации ( $\text{м/с}^2$ ): обычновенные с повышенной прочностью (ОП), выдерживающие ускорение до  $15 \text{ м/с}^2$ , нечувствительные к вибрации (ВН), вибропрочные (ВП), нечувствительные к тряске (ТН), тряскопрочные (ТП) и ударопрочные (У).

На шкале измерительных приборов условными значками и цифрами обозначаются следующие данные: род тока, система прибора, величина напряжения, при котором испытана прочность изоляции обмотки измерительного механизма, класс точности, рабочее положение шкалы.

## 5.2. Общее в конструкции приборов

В электроизмерительных приборах различают подвижную (рис. 5.1) и неподвижную части. В основу взаимодействия подвижной и неподвижной частей прибора положены магнитные, электромагнитные действия электрического тока. Возникающий вследствие этого врачающий момент поворачивает подвижную часть прибора вместе с указательной стрелкой. Вращающий момент  $M_{ep}$  зависит от значения измеряемой величины. Для фиксации указательной стрелки в определенном положении, соответствующем значению измеряемой величины, необходимо создавать противодействующий момент  $M_{np}$ , равный по величине врачающему моменту.

Обычно противодействующий момент создается при помощи спиральных пружин 2 из фосфористой бронзы.

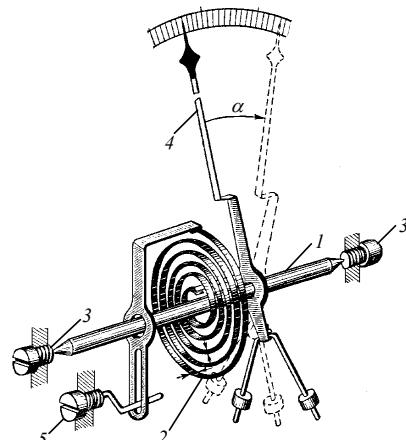


Рис. 5.1. Устройство подвижной части электроизмерительного прибора

Ось 1 подвижной части для уменьшения трения концами опирается в подпятник 3. В подпятниках цилиндрической формы применяют либо опорные камни (обычно агат, корунд), либо бронзу. Подпятник с пружинящей опорой используют для переносных приборов, опору с шариковыми подшипниками - для приборов с высокой степенью тряскоустойчивости.

Для установки стрелки 4 на нулевую отметку шкалы применяют корректор 5. При повороте корректора происходит закручивание или ослабление спиральной пружины, а следовательно, перемещение стрелки прибора.

Одним из условий, предъявляемых к прибору, является быстрое успокоение его подвижной части, достигаемое применением специальных приспособлений - успокоителей, использующих механическое сопротивление воздуха (рис. 5.2,а) или магнитоиндукционное торможение (рис. 5.2,б).

Действие магнитоиндукционного успокоителя основано на взаимодействии постоянного магнита и вихревых токов, индуцированных полем в алюминиевом диске при колебаниях стрелки. Согласно закону Ленца, это вызывает торможение диска.

### 5.3. НОМИНАЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ПОСТОЯННЫЕ ПРИБОРОВ

Номинальная величина прибора обычно (напряжение  $U_{nom}$  вольтметра, ток  $I_{nom}$  амперметра, мощность  $P_{nom}$  ваттметра) определяется его верхним пределом измерения, или это есть наибольшее значение, которое может измерить электроизмерительный прибор.

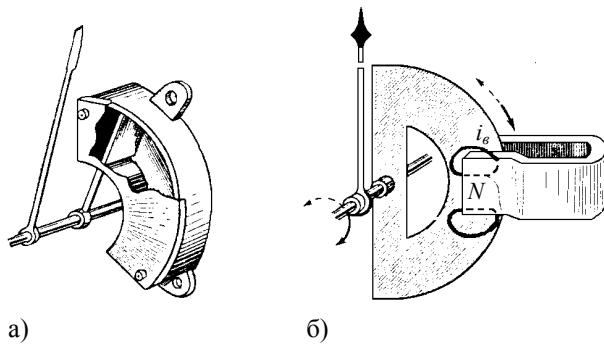


Рис. 5.2. Устройство успокоителей:  
(а) воздушного, (б) магнитоиндукционного

Постоянная прибора (цена деления) представляет собой значение измеряемой величины, вызывающее отклонение стрелки на одно деление шкалы. Таким образом, постоянная или цена деления прибора определяется значением наименьшего деления его шкалы. Цена деления, например, амперметра выражается:

$$C = \frac{I_{\text{ном}}}{N} \text{ [ампер на деление]}, \quad (5.1)$$

где  $N$  - число делений шкалы.

Для определения значения измеряемой величины (для многопредельного прибора) надо цену деления умножить на показание (количество делений, отсчитанное стрелкой) прибора.

#### 5.4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И КЛАСС ТОЧНОСТИ ПРИБОРОВ

Под чувствительностью приборов понимают число делений шкалы, приходящееся на единицу измеряемой величины. Чувствительность амперметра, например, может быть определена следующим образом:

$$S = \frac{N}{I_{\text{ном}}} \text{ [делений на ампер].} \quad (5.2)$$

Так как количество делений шкалы пропорционально углу отклонения подвижной части или стрелки прибора, чувствительность (5.2) можно выразить и через угол  $\alpha$ :

$$S = \frac{\alpha}{I_{\text{ном}}}. \quad (5.3)$$

Сравнивая выражения (5.1) и (5.2) можно заключить, что чувствительность есть величина, обратная цене деления прибора.

$$S = \frac{1}{C}. \quad (5.4)$$

Электрические измерения, как и любой другой вид измерения, выполняются с какой-то степенью точности. Показания электроизмерительных приборов несколько отличаются от действительных значений измеряемых величин. Это вызвано несовершенством конструкции прибора, влиянием внешних факторов, непостоянством параметров измерительной цепи и т.д.

Разность между измеренным  $A_H$  и действительным  $A_D$  значениями измеряемой величины называется абсолютной погрешностью измерения:

$$\Delta A = A_H - A_D. \quad (5.5)$$

Если не учитывать значения измеряемой величины, то абсолютная погрешность не дает представления о степени точности измерения. Пусть в результате измерений напряжений в первом случае величиной в 100 В, а во втором случае - 5 В получены одинаковые абсолютные погрешности  $\Delta U = 1\text{V}$ . Нетрудно заключить, что в первом случае измерение выполнено с достаточной степенью точности, а во втором случае степень точности недостаточна.

Поэтому погрешность измерения принято оценивать не абсолютной, а относительной погрешностью.

Относительная погрешность измерения представляет собой отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_D} \cdot 100\% = \frac{A_H - A_D}{A_D} \cdot 100\% \quad (5.6)$$

На практике за действительное значение измеряемой величины принимают значение, которое определяется по показанию образцового прибора.

Точность электроизмерительного прибора характеризуется основной приведенной погрешностью.

Приведенной погрешностью прибора называют абсолютную погрешность, выраженную в процентах по отношению к номинальной величине прибора:

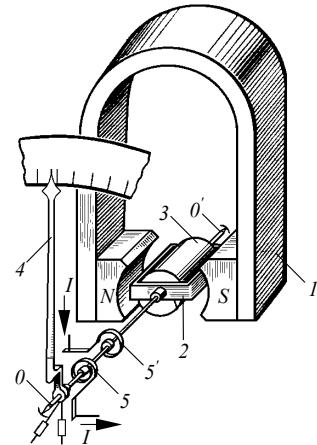
$$\gamma_{np} = \frac{\Delta A}{A_{nom}} \cdot 100\% = \frac{A_H - A_D}{A_{nom}} \cdot 100\% \quad (5.7)$$

Приведенная погрешность прибора, определенная при нормальных условиях (нормальное положение шкалы, нормальная температура 20°C, отсутствие внешних магнитных полей и т.д.), называется основной приведенной погрешностью. Основная приведенная погрешность определяет одну из основных характеристик электроизмерительных приборов - класс точности.

## 5.5. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Рис. 5.3.  
электроизмерительного

Устройство  
прибора



#### непосредственной оценки

Наиболее широкое распространение получили измерительные приборы непосредственной оценки (прямого отсчета). По принципу действия и конструкции измерительного механизма электроизмерительные приборы делятся на следующие системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, индукционную, электростатическую и др.

#### 5.6. Магнитоэлектрическая система

Принцип действия магнитоэлектрических приборов (рис. 5.3) основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита 1 и обмотки с током 2.

Обмотка выполнена в виде катушки с числом витков  $W$ , намотанной из изолированного тонкого (диаметр не более 0,2 мм) медного провода на легкую алюминиевую рамку и располагается в зазоре между полюсными наконечниками  $NS$  и неподвижным стальным цилиндром 3.

Рамка жестко соединена с двумя полуосями  $00'$ , которые своими концами опираются о подшипники. На полуоси закреплены стрелка 4 и две спиральные пружинки 5 и  $5'$ . Эти пружинки не только предназначены для создания противодействующего момента, но и еще по ним к катушке подводится измеряемый ток  $I$ . В зазоре между полюсными наконечниками и стальным цилиндром обеспечивается равномерное магнитное поле с индукцией  $B$ . При прохождении тока по обмотке катушки в результате взаимодействия магнитных полей тока и постоянного магнита создается

вращающий момент, стрелка поворачивается и отклоняется на угол  $\alpha$ . Электромагнитная сила  $F_{\vartheta M}$ , действующая на обмотку с током, равна:

$$F_{\vartheta M} = WBII. \quad (5.8)$$

Вращающий момент, создаваемый силой  $F_{\vartheta M}$ , равен

$$M_{\vartheta p} = F_{\vartheta M} \cdot d = WBId = C_1 I, \quad (5.9)$$

где  $l$  и  $d$  - длина и ширина рамки (обмотки);  $C_1$  - коэффициент, зависящий от числа витков  $W$ , размеров обмотки и магнитной индукции  $B$ .

Жесткость спиральных пружин создает противодействующий момент, пропорциональный углу закручивания  $\alpha$

$$M_{np} = C_2 \alpha, \quad (5.10)$$

где  $C_2$  - коэффициент, зависящий от жесткости пружин.

Стрелка устанавливается на определенном делении шкалы при достижении равенства моментов

$$M_{\vartheta p} = M_{np}, \quad (5.11)$$

т.е., когда

$$C_1 I = C_2 \alpha. \quad (5.12)$$

Отсюда угол поворота стрелки

$$\alpha = \frac{C_1}{C_2} I. \quad (5.13)$$

пропорционален току. Следовательно, у приборов магнитоэлектрической системы шкала равномерная, что является их достоинством.

При сравнении выражений (5.3) и (5.13) видно, что постоянный коэффициент  $\frac{C_1}{C_2}$  является чувствительностью прибора, т.е.

$$S = \frac{C_1}{C_2}. \quad (5.14)$$

Учитывая выражения (5.9) - (5.12), следует заключить, что повышение чувствительности прибора может быть получено за счет увеличения магнитной индукции  $B$  при заданном значении количества витков обмотки и размеров рамки и также за счет уменьшения жесткости пружин, создающих противодействующий момент.

Магнитную индукцию в воздушном зазоре увеличивают за счет применения постоянных магнитов, обеспечивающих индукцию в зазоре  $0,2 \div 0,3$  Тл. Магнитоэлектрические приборы, имеющие достаточно высокую индукцию магнитного поля, относятся к приборам относительно высокой чувствительности.

Измерительный механизм магнитоэлектрической системы действует при постоянном токе. А при включении прибора магнитоэлектрической

системы в цепь переменного тока на катушку измерительного механизма действует электромагнитный момент, изменяющийся по величине и направлению с частотой, равной переменному току. В результате среднее значение врачающего момента равняется нулю, и стрелка прибора не будет отклоняться от нулевого положения. Поэтому недостатком приборов магнитоэлектрической системы является то, что их нельзя применять непосредственно для измерений в цепях переменного тока.

В приборах магнитоэлектрической системы успокоение (демпфирование) подвижной части, и, следовательно, стрелки происходит, благодаря использованию магнитоиндукционного успокоителя.

Приборы магнитоэлектрической системы можно использовать в цепях переменного тока, если в цепь катушки включить преобразователи переменного тока в постоянный ток. В качестве преобразователей чаще всего используются выпрямительные и термоэлектрические схемы.

На рис. 5.4(а) показана выпрямительная схема, позволяющая использовать приборы магнитоэлектрической системы в цепях переменного тока. Измерительный прибор магнитоэлектрической системы МЭ включен в диагональ  $AB$  выпрямительного моста из полупроводниковых элементов.

Тогда через обмотку измерительного механизма прибора МЭ протекает пульсирующий ток одного направления, который создает врачающий момент, действующий в одном направлении, пропорциональный по величине значению тока  $I$ .

На рис. 5.4(б) показана схема применения термоэлектрического преобразователя. Обмотка магнитоэлектрического прибора МЭ соединена со свободными концами термопары 1, другие концы термопары, образующие спай, нагреваются измеряемым переменным током, проходящим через нагревательный элемент 2. Отклонение стрелки измерительного прибора пропорционально величине ЭДС термопары.

Шкала прибора может быть проградуирована в единицах измеряемого тока или в единицах других величин, функционально с ним связанных.

В практике электрических измерений наибольшее распространение получили следующие термопары: железо-константан, манганин-константан, хромель-копель и др. При допустимой температуре точки спая этих термопар от 200 до 600° величина термо-ЭДС достигает от 10 до 45 мВ.

Для нагревателей берется материал с большим удельным сопротивлением и высокой температурой плавления, в частности, вольфрам, никром и др.

Через обмотку измерительного механизма магнитоэлектрического прибора пропускаются токи до 100 мА, если прибор используется как амперметр, и до 10 мА - если используется он как вольтметр. Большие токи вызвали бы увеличение сечения проводов обмотки рамки, а следовательно, утяжелела бы подвижная часть прибора. Пределы измерения по току в магнитоэлектрических приборах расширяют с помощью шунтов, а по напряжению - с помощью добавочных сопротивлений.

При измерении тока  $I$ , который в  $n$  раз больше тока  $I_p$  в обмотке рамки прибора, сопротивление шунта  $r_u$  (рис. 5.5) рассчитывают из условия равенства падений напряжения ввиду параллельного включения шунта к прибору:

$$r_u I_u = r_p I_p, \quad (5.15)$$

где  $r_u$  и  $r_p$  - соответственно сопротивление шунта и обмотки рамки;  $I_u$  и  $I_p$  - токи шунта и обмотки.

Так как по условию измеряемый ток  $I = nI_p$ , то с учетом (5.15) получим:

$$\frac{r_u}{r_p} = \frac{I_p}{I_u}.$$

Согласно схеме  $I_u = I - I_p$ , тогда

$$\frac{r_u}{r_p} = \frac{I_p}{nI_p - I_p} = \frac{1}{n-1} \quad \text{и} \quad (5.16)$$

$$r_u = \frac{r_p}{n-1}.$$

Таким образом, для измерения тока в  $n$  раз большего, чем ток обмотки рамки, необходимо использовать шунт сопротивлением в  $(n - 1)$  раз меньший, чем сопротивление обмотки измерительного механизма  $r_p$ .

Шунты встраивают в корпус прибора или выполняют отдельными от

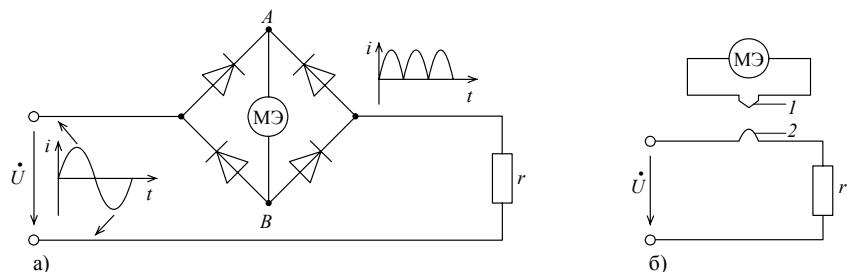


Рис. 5.4. Схемы включения магнитоэлектрических приборов посредством выпрямительной (а), термоэлектрической (б) схем в цепь переменного тока

прибора. Изготавливают шунты из манганина, обладающего малым температурным коэффициентом сопротивления. Для расширения пределов измерений вольтметра магнитоэлектрической системы последовательно с обмоткой рамки включают дополнительное сопротивление  $r_D$  (рис. 5.6).

Когда необходимо расширить в  $n$  раз предел измерения вольтметра, то дополнительное сопротивление вычисляется по формуле:

$$r_D = (n-1) r_p, \quad (5.17)$$

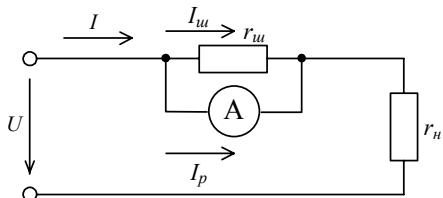
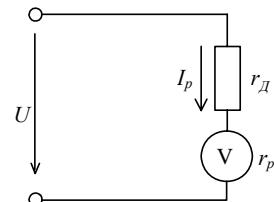


Рис. 5.6. Схема включения вольтметра в сеть с дополнительным сопротивлением  $r_D$

Рис. 5.5. Схема включения шунта к магнитоэлектрическому прибору



где  $r_p$  - сопротивление рамки обмотки измерительного механизма прибора.

К достоинствам приборов магнитоэлектрической системы относятся: равномерная шкала, большая точность, малая чувствительность к внешним магнитным полям из-за сильного собственного магнитного поля, малое собственное потребление энергии.

К недостаткам таких приборов относятся: пригодность использования (без преобразователей) только в цепях постоянного тока, малая перегрузочная способность, относительная сложность конструкции и сравнительно высокая стоимость.

### 5.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Принцип действия электромагнитных приборов основан на взаимодействии магнитного поля катушки с током со стальным сердечником, находящимся в этом поле.

Измерительный механизм прибора электромагнитной системы выпускается в двух конструктивных вариантах: с плоской и круглой катушкой.

Электромагнитный прибор с плоской катушкой (рис. 5.7) состоит из неподвижной части - плоской катушки 1 с ее обмоткой, выполненной из изолированного провода, и подвижной части - стального сердечника 2, эксцентрично укрепленного на оси 00; стрелки 3, жестко соединенной с этой осью. Спиральная пружина 4 создает противодействующий момент. Для успокоения подвижной части прибора обычно применяют воздушный успокоитель 5. Он состоит из цилиндра и поршня, шток которого укреплен на оси 00. Сопротивление воздуха, оказываемое перемещению поршня в цилиндре, обеспечивает успокоение стрелки.

При прохождении тока  $I$  по обмотке катушки образуется магнитное поле. Стальной сердечник 2, находящийся в этом поле, намагничивается и втягивается, во внутрь катушки. В результате ось 00 поворачивается, и стрелка прибора отклоняется на угол  $\alpha$ .

Магнитная индукция  $B$  в сердечнике (при отсутствии насыщения) пропорциональна току обмотки  $I$ . Электромагнитная сила  $F$ , с которой сердечник втягивается в катушку, зависит от тока  $I$  и магнитной индукции  $B$  в сердечнике. Тогда можно считать, что сила  $F$ , а следовательно, и создаваемый ею вращающий момент пропорциональны квадрату тока в обмотке катушки:

$$M_{sp} = C_1 I^2, \quad (5.18)$$

где  $C_1$  - коэффициент, зависящий от числа витков и размеров катушки.

Противодействующий момент, пропорциональный углу закручивания  $\alpha$ , равен:

$$M_{np} = C_2 \alpha,$$

где  $C_2$  - коэффициент, зависящий от жесткости спиральной пружины.

Угол  $\alpha$ , определяемый при условии равенства вращающего и противодействующего моментов, выразится:

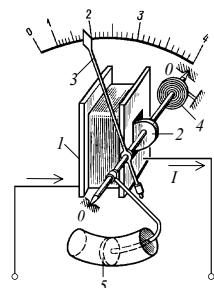
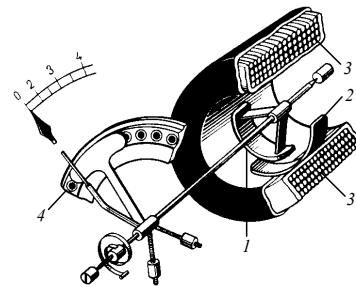


Рис. 5.7. Устройство электроизмерительного прибора электромагнитной системы с плоской катушкой

Рис. 5.8. Устройство электромагнитного прибора с круглой катушкой



$$\alpha = \frac{C_1}{C_2} I^2. \quad (5.19)$$

Квадратичная зависимость угла отклонения стрелки от тока показывает, что шкала приборов электромагнитной системы является неравномерной.

Придавая сердечнику специальную форму и изменяя его расположение относительно катушки, можно добиться некоторого уменьшения неравномерности в большей ее части, кроме начальных делений, которые остаются очень сильно сжатыми. Иногда такой нелинейный участок составляет 20 – 25% всей шкалы и часто не градуируется.

Принцип действия измерительного механизма с круглой катушкой (рис. 5.8) основан на взаимодействии двух стальных сердечников, помещенных в катушку. Подвижный сердечник 1, жестко укрепленный на оси прибора вместе со стрелкой, и неподвижный сердечник 2 при прохождении тока по катушке 3 намагничиваются так, что они отталкиваются, и в результате создается врачающий момент. Этот момент также пропорционален квадрату тока. Данный механизм снабжен магнитоиндукционным успокоителем 4.

Достоинства приборов электромагнитной системы: простота конструкции, пригодность для измерения в цепях постоянного и переменного тока, перегрузочная способность, надежность в эксплуатации. К недостаткам относятся: неравномерность шкалы, малая точность и чувствительность (класс точности 1; 1,5; 2,5), влияние внешних магнитных полей на показания прибора. Последнее обусловлено тем, что магнитное поле обмотки расположено в воздушной среде, и поэтому его магнитная индукция невелика.

Для снижения влияния внешних магнитных полей применяются конструкции, в которых устанавливают две неподвижные катушки с

сердечниками, насыщенными на общую ось, так называемые астатические приборы (рис. 5.9).

Здесь обмотки катушек включены последовательно, но так, что их потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  направлены в противоположные стороны, а врачающие моменты, создаваемые этими потоками и действующие на подвижную часть прибора, согласны. При такой конструкции внешний магнитный поток  $\Phi_{\text{вн}}$  в одной катушке усиливает, а в другой уменьшает врачающий момент прибора на равные значения. Этим исключается влияние внешнего магнитного поля. Астатические приборы изготавливают для классов точности 0,5 и 1,0.

### 5.8. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Измерительный механизм приборов электродинамической системы (рис. 5.10,а) состоит из двух катушек: неподвижной 1 и подвижной 2. Неподвижную катушку выполняют из двух частей, между которыми проходит ось 00'. На этой оси укреплена подвижная катушка и расположена внутри неподвижной катушки. На оси также укреплены указательная стрелка 3 и шток поршня воздушного успокоителя. Прибор имеет две спиральные пружины 4 и 4', через которые подводится ток к обмотке подвижной катушки. Эти же пружины создают противодействующий момент  $M_{np}$ , пропорциональный углу закручивания  $\alpha$ .

Принцип действия прибора (рис. 5.10,б) основан на взаимодействии магнитных полей токов подвижной  $I_2$  и неподвижной  $I_1$  катушек.

При постоянном токе электромагнитная сила  $F_{\text{эм}}$ , действующая на проводники подвижной обмотки, пропорциональна току этой обмотки  $I_2$  и магнитному потоку  $\Phi_1$  неподвижной катушки. Поскольку поток  $\Phi_1$  пропорционален току  $I_1$ , то врачающий момент, действующий на подвижную катушку, пропорционален произведению токов обмоток:

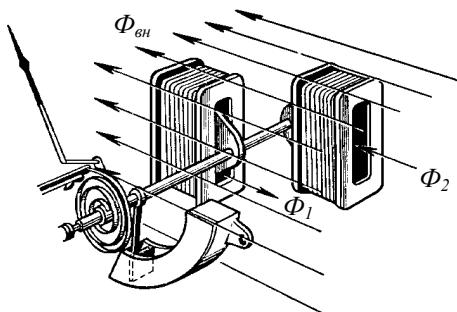


Рис. 5.9. Конструкция измерительного механизма астатического электромагнитного прибора

$$M_{\text{ep}} = C' \Phi_1 I_2 = C'' I_1 I_2, \quad (5.20)$$

где  $C'$  и  $C''$  - коэффициенты пропорциональности.

При равновесии моментов  $M_{np} = M_{\text{ep}}$  угол отклонения стрелки равен:

$$\alpha = CI_1 I_2.$$

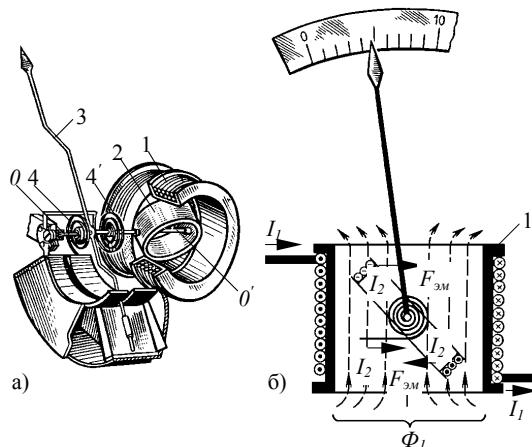


Рис. 5.10. Устройство электроизмерительного прибора электродинамической системы (а), к пояснению принципа действия прибора (б)

Приборы электродинамической системы применяются для измерения в цепях переменного и постоянного токов, так как направление вращающего момента не изменяется при изменении направления обеих токов.

При переменном токе вращающий момент пропорционален произведению мгновенных значений токов:

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad \text{и} \quad i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi)$$

Показание прибора (угол отклонения стрелки  $\alpha$ ) в этом случае определяется средним за период значением вращающего момента:

$$M_{\text{ep}} = \frac{1}{T} \int_0^T C'' i_1 i_2 dt = C_1 I_1 I_2 \cos \psi, \quad (5.21)$$

где  $C_1$  – коэффициент, зависящий от числа витков, геометрических размеров и расположения катушек;

$I_1$  и  $I_2$  - действующие значения токов в обмотках;

$\psi$  - угол сдвига фаз между векторами токов  $I_1$  и  $I_2$ .

При  $M_{\text{ep}} = M_{np}$  угол отклонения стрелки определяется:

$$\alpha = CI_1 I_2 \cos \psi, \quad (5.22)$$

где  $C = \frac{C_1}{C_2}$ , а  $C_2$  – коэффициент, зависящий от жесткости пружин.

В зависимости от способа взаимного включения катушек электродинамический прибор может быть использован как амперметр, вольтметр, ваттметр (рис. 5.11).

Параллельное соединение обмоток прибора применяют в амперметрах, и это дает уменьшение внутреннего сопротивления прибора.

При использовании прибора в качестве вольтметра, обычно имеющего большое сопротивление, обмотки катушек соединяются последовательно и включается еще добавочное сопротивление  $r_D$ .

Если прибор используется в качестве ваттметра, то обмотку неподвижной катушки включают последовательно с нагрузкой ( $I_1 = I$ ), а обмотку подвижной катушки, соединенную последовательно с добавочным сопротивлением, параллельно к нагрузке.

Тогда :

$$I_2 = \frac{U}{r_2 + r_D},$$

где  $r_2$  – сопротивление подвижной катушки.

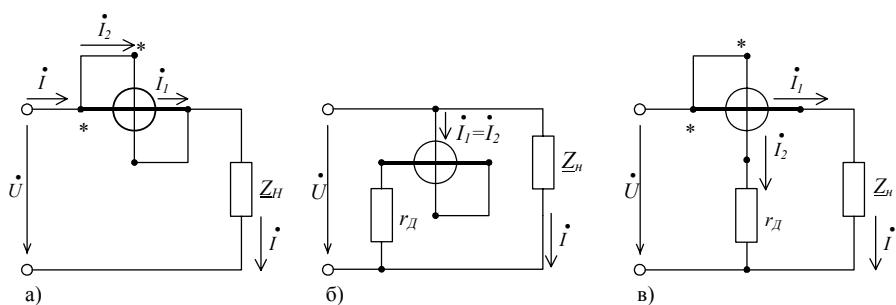


Рис. 5.11. Схемы включения электродинамических приборов: (а) амперметра, (б) вольтметра, (в) ваттметра

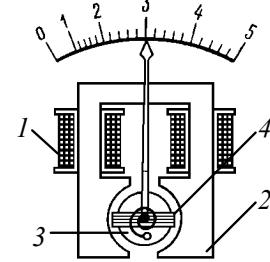
С учетом (5.21) и  $I_1 = I$  для угла отклонения ваттметра имеем:

$$\alpha = \frac{CIU \cos \psi}{r_2 + r_D}. \quad (5.23)$$

Угол  $\psi$  равен в этом случае углу сдвига фаз между током  $I$  и напряжением  $U$ , тогда:

$$\alpha = \frac{CIU \cos \varphi}{r_2 + r_D} = C_W UI \cos \varphi = C_W P, \quad (5.24)$$

Рис. 5.12. Устройство измерительного механизма ферродинамической системы



где  $C_W$  - постоянная ваттметра;  $P$  - активная мощность нагрузки.

Из уравнения (5.24) видно, что шкала электродинамического ваттметра равномерная.

При измерении ваттметром важно соблюдать правило его включения в цепь, ибо направление отклонения подвижной части прибора зависит от взаимного направления токов в катушках.

Для правильного включения обмоток их зажимы маркируют. Зажимы последовательной или токовой обмотки (неподвижной катушки) обозначают  $I$ , а зажимы параллельной или обмотки напряжения (подвижной катушки) обозначают  $U$ .

Начала обмоток, к которым необходимо присоединять провода со стороны источника питания, отмечают знаком \* (звездочка), эти зажимы называют еще «генераторными» зажимами.

При включении генераторные зажимы тока и напряжения обычно соединяют вместе и включают провод со стороны источника или сети, что обеспечивает правильное направление отклонения стрелки прибора.

Для самопищущих приборов и приборов, где требуются большие вращающие моменты, используют ферродинамические измерительные механизмы. В этих приборах (рис. 5.12) обмотка неподвижной катушки 1 размещается на стальном сердечнике 2, выполненном из ферромагнитного материала (из листовой электротехнической стали).

В зазоре между сердечником 2 и цилиндром 3 расположена подвижная катушка 4. Наличие сердечника усиливает магнитные поля катушек с токами и вызывает увеличение вращающего момента. Точность ферродинамических приборов меньше, чем точность электродинамических приборов.

Достоинства электродинамических приборов: пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного тока, возможность

измерения напряжения, тока, мощности, достаточно высокая точность, равномерность шкалы у ваттметров.

Недостатки: сравнительно большое собственное потребление при измерении токов и напряжений, сложность конструкции и высокая стоимость, чувствительность к внешним магнитным полям.

### 5.9. ИНДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА

Приборы индукционной системы служат для измерения расхода электрической энергии в цепях переменного тока. Принцип действия индукционных приборов поясним на упрощенной схеме устройства однофазного счетчика переменного тока (рис. 5.13).

Основными частями прибора являются: трехстержневой электромагнит 1 с обмоткой 2, имеющей большое число витков из тонкого провода;

П-образный электромагнит 3 с обмоткой 4, имеющей небольшое число витков из относительно толстого провода; алюминиевый диск 5 на оси 6.

Обмотка 2, называемая обмоткой напряжения, включается параллельно, а обмотка 4, называемая токовой обмоткой, включается последовательно к нагрузке  $Z_u$ . Ток  $I_1$ , проходящий через обмотку последовательной катушки 4, образует магнитный поток  $\Phi_1$ , он дважды пересекает алюминиевый диск 5. Ток  $I_2$ , проходящий через обмотку параллельной катушки 2, создает магнитный поток, часть которого  $\Phi_2$ , также пронизывает диск 5 (поток  $\Phi_2$  замыкается по стальной скобе 7).

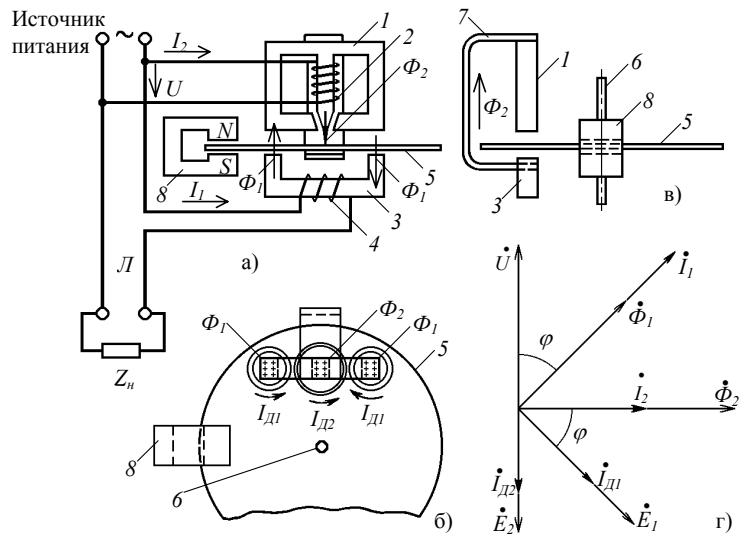


Рис. 5.13. Устройство электроизмерительного прибора индукционной системы (счетчика электрической энергии)

Ток  $I_1$  и напряжение  $U$  сдвинуты по фазе на угол  $\varphi$  в зависимости от характера нагрузки  $Z_n$ . Ток  $I_2$ , благодаря большой индуктивности обмотки 2, отстает по фазе от напряжения  $U$  на угол, близкий к  $90^\circ$ . Магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  совпадают по фазе с вызвавшими их токами  $I_1$  и  $I_2$  (рис. 5.13,  $\varepsilon$ ). Поток  $\Phi_1$  пропорционален току нагрузки  $I_1$ , а поток  $\Phi_2$  - напряжению сети.

Переменные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  индуцируют в алюминиевом диске ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , отстающие по фазе от этих потоков на  $90^\circ$ . ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  вызывают в диске вихревые токи  $I_{D1}$  и  $I_{D2}$ , которые можно считать совпадающими по фазе с вызвавшими их ЭДС (рис. 5.13,  $\delta$  и  $\varepsilon$ ).

Мгновенное значение электромагнитной силы  $F_{\text{эм}}$ , на элемент диска с током  $i_D$  равно:

$$F_{\text{эм}} = \kappa \Phi i_D = \kappa \Phi_m \sin \omega t I_{Dm} \sin(\omega t + \psi),$$

где  $\kappa$  - коэффициент пропорциональности;

$\psi$  - угол сдвига фаз между потоком  $\Phi$  и током  $I_D$ .

Среднее за период значение силы  $F_{\text{эм}}$  равно:

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{\text{эм}} dt = \frac{\kappa_1 \Phi_m I_{Dm}}{T} \int_0^T \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \psi) dt = \kappa_2 \Phi I_D \cos \psi$$

Из векторной диаграммы видно, что углы между потоком  $\Phi_1$  и током  $I_{Д1}$ , между потоком  $\Phi_2$  и током  $I_{Д2}$  равны  $90^\circ$ , угол между потоком  $\Phi_1$  и током  $I_{Д2}$  составляет  $(180^\circ - \varphi)$ , а угол между потоком  $\Phi_2$  и током  $I_{Д1}$  равен  $\varphi$ . Следовательно, взаимодействия магнитного потока и тока, где угол между ними не равен  $90^\circ$ , т.е.  $\Phi_1$  и  $I_{Д2}$ , также  $\Phi_2$  и  $I_{Д1}$ , создают результирующий момент, вращающий диск:

$$M_{\text{вр}} = C_1 \Phi_1 I_{Д2} \cos(180^\circ - \varphi) + C_2 \Phi_2 I_{Д1} \cos \varphi =$$

$$= C' \Phi_1 \Phi_2 \cos(180^\circ - \varphi) + C' \Phi_1 \Phi_2 \cos \varphi = CUI_1 \cos \varphi = CP, \quad (5.25)$$

где  $C'$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  - коэффициенты пропорциональности;

$P$  - активная мощность, потребляемая нагрузкой.

Из выражения (5.25) следует, что вращающий момент, действующий на диск счетчика, пропорционален мощности  $P$ .

Для получения равномерного вращения диска с помощью постоянного магнита  $\delta$ , охватывающего край диска, создается тормозной или противодействующий момент  $M_{np}$ .

При вращении диск пересекает магнитные силовые линии постоянного магнита, и, согласно закону Ленца, в нем наводятся вихревые токи, магнитными полями препятствующие движению диска.

Поскольку значение вихревых токов пропорционально частоте вращения диска  $n$ , то противодействующий момент также пропорционален  $n$ :

$$M_{np} = C_0 n.$$

Равномерность вращения диска имеет место при условии равенства вращающего и противодействующего моментов:

$$M_{\text{вр}} = M_{np} \text{ или } CP = C_0 n,$$

тогда частота вращения диска пропорциональна мощности  $P$ :

$$n = \frac{C}{C_0} P. \quad (5.26)$$

Число оборотов  $N$ , которое диск сделает за время  $t$ , будет пропорционально энергии  $W$ , полученной из сети нагрузкой за это же время:

$$N = \int_0^t n dt = \frac{C}{C_0} \int_0^t P dt = \frac{C}{C_0} W \quad (5.27)$$

Величина  $\frac{W}{N} = \frac{C_0}{C}$  называется постоянной счетчика, и она равна электрической энергии, соответствующей одному обороту диска.

Счетчик снабжается счетным механизмом, связанным червячной передачей с осью диска. Измеряемая счетчиком энергия отсчитывается по показаниям счетного механизма.

При использовании счетчика надо учесть следующее.

Обмотка напряжения счетчика все время находится под напряжением. Увеличение напряжения сети может вызвать вращение диска без подключения нагрузки, т.е. самоход счетчика. Согласно требованиям эксплуатации, счетчик не должен иметь самохода при напряжении от 90 до 110° номинального.

Схема включения однофазного счетчика в сеть дана на рис. 5.14.

Для правильного включения счетчика следует различать его зажимы: первый и третий зажимы подключаются к источнику (сети) и называются генераторными, а второй и четвертый подключаются к нагрузке и называются нагрузочными.

Для измерения энергии в цепи трехфазного тока применяются трехфазные счетчики индукционной системы с двумя или тремя элементами в зависимости от трех- или четырехпроводности сети.

Двухэлементный трехфазный счетчик состоит из двух пар электромагнитов и двух алюминиевых дисков, расположенных на одной оси (рис. 5.15). Двухэлементный трехфазный счетчик включается в трехпроводную сеть, а трехэлементный - в четырехпроводную.

Индукционные счетчики нечувствительны к внешним магнитным полям, надежны в работе и выдерживают значительные перегрузки. По точности счетчики делятся на классы 1,0; 2,0; 2,5. Для счетчиков класс точности определяется не по приведенной, а по относительной погрешности.

Рассмотрены устройство и принцип действия индукционного счетчика активной энергии. Для учета реактивной энергии используют специальные индукционные счетчики, имеющие некоторые изменения в устройстве обмоток или в схеме включения.

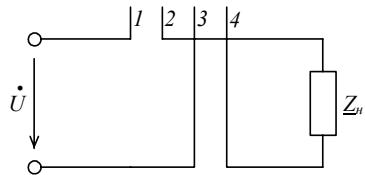
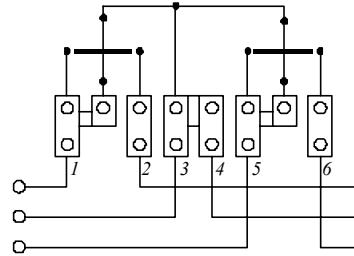


Рис. 5.14. Схема включения однофазного счетчика в сеть

Рис. 5.15. Схема включения двухэлементного трехфазного индукционного счетчика в трехпроводную трехфазную сеть



### 5.10. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В электростатических измерительных механизмах вращающий момент возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводящих пластин, одна из которых подвижная. На рис. 5.16 показано устройство электростатического измерительного механизма. Он состоит из неподвижных пластин *1*, на которые подается потенциал одного знака, и подвижных пластин *2*, на которые подается потенциал другого знака.

Подвижные пластины вместе с указательной стрелкой укреплены на оси и под действием сил электрического поля поворачиваются относительно неподвижных пластин.

При постоянном напряжении *U* между пластинами вращающий момент пропорционален произведению зарядов  $Q = CU$  на пластинах:

$$M_{\text{ep}} = \kappa Q^2 = \kappa C^2 U^2. \quad (5.28)$$

При синусоидальном напряжении  $u = U_m \sin \omega t$  подвижная часть механизма реагирует на средний за период вращающий момент:

$$M_{\text{ep cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T \kappa C^2 u^2 dt = \kappa_2 U^2,$$

где *U* - действующее значение напряжения.

Электростатические приборы применяют исключительно в качестве вольтметров постоянного и переменного напряжений.

Из выражения (5.28) следует, что шкала электростатических приборов из-за квадратичной зависимости вращающего момента от напряжения

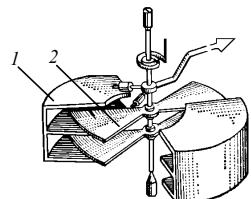


Рис. 5.16. Устройство электростатического измерительного механизма

должна быть неравномерной. Выбором форм и размеров пластин, а также их взаимного расположения удается получать практически равномерную шкалу, кроме начальной части.

Электростатические вольтметры отличаются малым потреблением энергии. Эта особенность обеспечивает возможность измерять электростатическим вольтметром напряжения в цепях малой мощности, не вызывая изменения этого напряжения током вольтметра.

Электростатические вольтметры широко применяются для измерений высоких напряжений, в частности в области, так называемой, электронно-ионной технологии, где применяется энергия сильных электрических полей для различных технологических процессов при ничтожно малых токах. По точности эти приборы соответствуют чаще всего классам 1,0; 1,5; 2,5.

### 5.11. ЛОГОМЕТРЫ

Логометрами (от греческого слова «*логос*» - отношение) называются электроизмерительные приборы, угол поворота измерительных механизмов которых зависит от отношения токов, протекающих по катушкам подвижной части. Подвижной частью являются две жестко связанные катушки, рис. 5.17.

Токи катушек  $I_1$  и  $I_2$  создают два противоположно направленных вращающих момента:

$$M_1 = \kappa_1 I_1 B_1 \quad \text{и} \quad M_2 = \kappa_2 I_2 B_2,$$

где  $B_1$  и  $B_2$  магнитные индукции, величины которых зависят от угла поворота подвижной части  $\alpha$ . Поэтому их можно выражать:

$$B_1 = f_1(\alpha) \quad \text{и} \quad B_2 = f_2(\alpha).$$

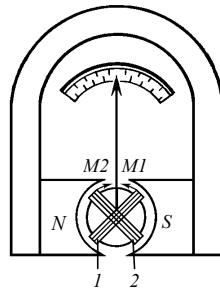


Рис. 5.17. Схема магнитоэлектрического логометра

При определенном значении угла  $\alpha$  происходит уравновешивание моментов  $M_1$  и  $M_2$ , и стрелка, жестко связанная с подвижной частью,

фиксируется в неподвижном положении. Такому установившемуся положению соответствует равенство:

$$\kappa_1 I_1 f_1(\alpha) = \kappa_2 I_2 f_2(\alpha) \quad \text{и}$$
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\kappa_2 f_2(\alpha)}{\kappa_1 f_1(\alpha)} = \kappa f(\alpha), \quad (5.29)$$

то есть угол поворота подвижной части прибора определяется отношением токов в катушках.

Поэтому логометры не имеют механического противодействующего момента и, следовательно, при отсутствии тока в катушках стрелка может занимать любое произвольное положение на шкале прибора.

В форме логометра может быть исполнена не только как данная на рис. 5.17 магнитоэлектрическая система, но и любая система, если в нем не только вращающий, но и противодействующий момент создаются электрическим путем.

Магнитоэлектрические логометры применяются для измерения сопротивлений, а электромагнитные и электродинамические - для измерения сдвига фаз, частоты тока, емкости и индуктивности.

Достоинством логометров является независимость показания прибора от колебания напряжения в сети.

#### 5.12. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

На лицевой стороне электроизмерительных приборов дается ряд условных обозначений, позволяющих правильно выбрать прибор по их условиям эксплуатации. Согласно ГОСТу, на лицевой стороне прибора должны быть изображены:

- а) условное обозначение, единицы измерения измеряемой величины (табл. 5.1);
- б) условное обозначение системы прибора (табл. 5.2);
- в) условное обозначение рода тока, числа фаз, класса точности и т.д. (табл. 5.3);
- г) условное обозначение по условиям эксплуатации (табл. 5.4).

ТАБЛИЦА 5.1

**Условные обозначения приборов по наименованию**  
**(международное) единицы измерения измеряемой величины**

Род измеряемой величины	Название прибора	Условное обозначение
1	2	3
Ток	Амперметр Миллиамперметр Микроамперметр	A mA μA
Напряжение	Вольтметр Милливольтметр	V mV
Электрическая мощность	Ваттметр Киловаттметр	W kW
Электрическая энергия	Счетчик киловатт-часов	kWh
Сдвиг фаз	Фазометр	φ
Частота	Частотометр	Hz
Электрическое сопротивление	Омметр Мегаомметр	Ω MΩ

ТАБЛИЦА 5.2

**Условное обозначение системы прибора**

Система прибора	Обычный измерительный механизм	Логометрический измерительный механизм
Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой		
Магнитоэлектрическая с подвижным магнитом		
Электромагнитная		
Электродинамическая		
Ферродинамическая		

Индукционная		
Электростатическая		

ТАБЛИЦА 5.3

**Условные обозначения рода тока, класса точности и др. параметров, необходимых при выборе и эксплуатации прибора**

Условное обозначение	Расшифровка условного обозначения
1	2
—	Прибор постоянного тока
~~	Прибор постоянного и переменного тока
~	Прибор переменного тока
~~~	Прибор трехфазного тока
1,5	Прибор класса точности 1.5
★2	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ
↗	Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи не соответствует нормам
∠60°	Рабочее положение шкалы наклонное, под углом 60° к горизонту
└─┘	Рабочее положение шкалы горизонтальное
└─┘	Рабочее положение шкалы вертикальное
A, B, В	Исполнение прибора в зависимости от условий эксплуатации (свойств окружающей среды)



Категория прибора по степени защищенности от внешних магнитных полей

ТАБЛИЦА 5.4

**Условные обозначения группы прибора по их условиям эксплуатации**

Условия эксплуатации	Параметры окружающей среды	Группа приборов					
		A	Б	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	
	для сухих отапливаемых помещений	для неотапливаемых помещений	Для полевых, морских условий				
Рабочие	Температура, °C	+ 10 ÷ + 35	- 30 ÷ + 40	- 40 ÷ + 50	- 50 ÷ + 60	- 50 ÷ + 80	
	Относительная влажность (при температуре)	80 (+30)	90 (+30)	95 (+35)	95 (+35)	98 (+40)	

**5.13. МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

На практике применяют различные методы измерения электрических величин. Наибольшее распространение получил метод непосредственной оценки, где числовое значение измеряемой величины определяют непосредственно по показанию прибора, шкала которого отградуирована в единицах измеряемой величины. С помощью такого метода рассматривают при изучении электроизмерительных приборов возможности измерения тока, напряжения, мощности и электрической энергии.

В некоторых случаях электрическую и неэлектрическую величины приходится определять косвенно, т.е. по данным измерений других электрических величин. Рассмотрим некоторые из них.

**5.13.1. Измерение сопротивлений**

Для измерения сопротивлений служат омметры. В большинстве случаев в основе конструкции омметра применяется магнитоэлектрический измерительный механизм. Притом, для более точных измерений сопротивлений магнитоэлектрический механизм применяется в форме логометра.

Омметром с магнитоэлектрическим измерительным механизмом, в котором противодействующий момент создается пружинами, измеряется сопротивление больших величин, где необязательна большая точность. В этом случае измерительный механизм ИМ соединяется последовательно с измеряемым сопротивлением  $r_x$  (рис. 5.18,а).

По закону Ома ток в цепи:

$$I = \frac{U}{r_x + r_k + r_D}, \quad (5.30)$$

где  $U$  - напряжение батареи (аккумулятора);

$r_x$  - измеряемое сопротивление;

$r_k$  - сопротивление катушки измерительного механизма;

$r_D$  - постоянное добавочное сопротивление в приборе.

При условии постоянства по величине напряжения  $U$  прибор может быть проградуирован для непосредственного отсчета по его шкале значений измеряемого сопротивления  $r_x$ . Нулевому значению тока (ключ  $K$  разомкнут и сопротивление  $r_x$  - отключено) соответствует деление шкалы  $r_x = \infty$ , а нулевому значению сопротивления  $r_x$  (ключ  $K$  замкнут) соответствует деление, определяемое током:

$$I = \frac{U}{r_k + r_D}.$$

Поэтому шкала имеет обратный порядок, т.е. нулевое деление отмечено справа, а слева  $-\infty$ .

Ключ  $K$ , замыкающий накоротко выводы, к которым соединяется сопротивление  $r_x$ , обычно используется для настройки прибора на нулевое деление.

Шкала у прибора с последовательным соединением весьма неравномерна.

Для измерений малых сопротивлений (порядка десятых долей Ома) применяется параллельное соединение измерительного механизма с измеряемым сопротивлением  $r_x$  (рис. 5.18,б).

После некоторых преобразований можно получить ток через измерительный механизм:

$$I = \frac{Ur_x}{r_x(r_k + r_D) + r_k r_D} \quad (5.31)$$

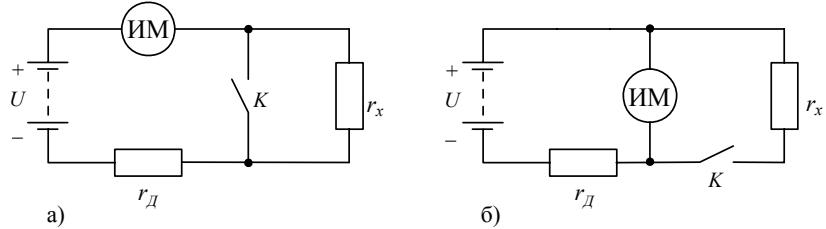


Рис. 5.18. Схемы для измерений больших (а), малых (б) сопротивлений

Из этого выражения видно, что при постоянстве напряжения  $U$  ток  $I$  или показание прибора зависит от измеряемого сопротивления  $r_x$ . Поэтому шкала прибора может быть проградуирована в Омах. При разомкнутом ключе  $K$  стрелка должна быть на делении, соответствующем  $\infty$ .

Напряжение  $U$  источника с течением времени уменьшается, поэтому для корректирования омметры снабжаются регулируемыми магнитными шунтами, которые обеспечивают изменение магнитной индукции в воздушном зазоре прибора.

Для измерения сопротивлений изоляции обмоток приборов и машин, проводов и кабелей, очень больших сопротивлений применяют мегаомметры. Притом, измерение сопротивления изоляции должно производиться при напряжении прибора не меньшем, чем рабочее напряжение установки. Чтобы получить такое напряжение, используется магнитоэлектрический генератор, приводимый во вращение от руки. ЭДС генератора достигает довольно высоких значений (500-2000 В), благодаря чему мегаомметром можно измерить сопротивления, исчисляемые мегаомами.

Для измерения сопротивлений применяется еще и мостовой метод.

На рис. 5.19 дана схема, позволяющая измерять электрическое сопротивление посредством сравнения с известными сопротивлениями. Такую схему называют измерительным мостом постоянного тока. Данный

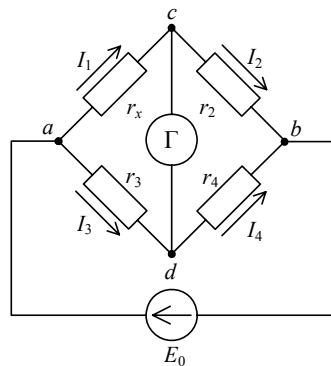


Рис. 5.19. Схема одинарного моста постоянного тока

мост содержит четыре плеча с сопротивлениями  $r_x$  (измеряемое),  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$  и две диагонали, содержащие соответственно источник постоянного тока с ЭДС  $E_0$  и гальванометр магнитоэлектрической системы Г. Такой мост называют одинарным в отличие от двойного, имеющего шесть плеч.

Рассмотрим принцип измерения неизвестного сопротивления  $r_x$ , включенного в одно из плеч одинарного моста постоянного тока.

В основу принципа измерения принимается условие равновесия моста, заключающегося в отсутствии тока через диагональ, содержащий гальванометр Г. А это условие будет достигнуто при отсутствии разности потенциалов между точками  $c$  и  $d$ , т.е. при равенстве потенциалов между этими точками. Равновесие моста контролируют по нулевому показанию гальванометра Г, а этого добиваются посредством регулирования сопротивлений плеч.

Условие равновесия моста будет при соблюдении следующих соотношений:

$$I_1 = I_2, \quad I_3 = I_4, \quad r_x I_1 = r_3 I_3, \quad r_2 I_2 = r_4 I_4$$

Разделив почленно два последних равенства и учитывая два первых равенства, получим:

$$\frac{r_x}{r_2} = \frac{r_3}{r_4} \quad \text{или} \quad r_x r_4 = r_2 r_3 \quad (5.32)$$

Полученное соотношение (5.32) является уравнением равновесия моста. Таким образом, можно заключить, что произведения сопротивлений элементов, включенных в противоположные плечи уравновешенного моста, равны друг другу.

Полученное уравнение позволяет рассчитать измеряемое сопротивление  $r_x$ :

$$r_x = r_2 \frac{r_3}{r_4} \quad (5.33)$$

Необходимо учитывать, что одинарный мост служит для измерений только средних по величине сопротивлений. Если сопротивление мало, и оно сравнимо с сопротивлениями соединительных проводов и контактов в местах соединений, то неизбежно погрешности будут достигать величины этого измеряемого сопротивления.

При больших сопротивлениях, достигающих  $10^5$  Ом, измерения моста ограничены шунтирующим действием токов утечки.

Для измерения малых сопротивлений служат двойные мосты, а для измерения больших сопротивлений - специальные мосты.

### 5.13.2. Измерение емкости и индуктивности

Емкость и индуктивность могут быть измерены с помощью мостов переменного тока (рис. 5.20). Условие равновесия моста переменного тока

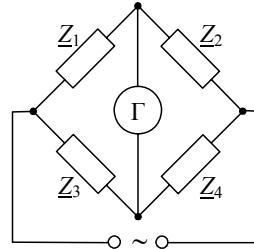


Рис. 5.20. Мост переменного тока

может быть записано на основе принципа равновесия моста постоянного тока:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3, \quad (5.34)$$

где  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3, \underline{Z}_4$  - комплексные сопротивления плеч.

Уравнение (5.34) в показательной форме имеет вид

$$Z_1 Z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = Z_2 Z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)},$$

а это условие будет выполняться при

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \text{ и } \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Если суммарное значение фазовых сдвигов подобрать равным нулю, то величину измеряемого значения индуктивности или емкости можно определить из уравнения равновесия, записанного по модулям сопротивлений. Например, такому условию соответствуют сопротивления плеч моста:

$$Z_1 = r_1; \quad Z_4 = r_4; \quad Z_2 = X_L; \quad Z_3 = X_C,$$

тогда

$$\varphi_1 + \varphi_4 = 0 + 0 = 0 \text{ и } \varphi_2 + \varphi_3 = \frac{\pi}{2} + \left(-\frac{\pi}{2}\right) = 0$$

На рис. 5.21 дана схема моста переменного тока для измерения емкости  $C_x$  при наличии на одном из плеч известной по величине образцовой емкости  $C_0$ . Путем регулирования сопротивлений  $r_2$  и  $r_3$  устанавливают равновесие моста, а затем на основе уравнения равновесия получим соотношение:

$$\frac{1}{\omega C_x} r_3 = \frac{1}{\omega C_0} r_2 \text{ или } \frac{r_3}{C_x} = \frac{r_2}{C_0},$$

откуда

$$C_x = C_0 \frac{r_3}{r_2} \quad (5.35)$$

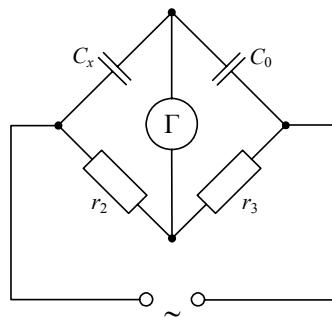


Рис. 5.22. Электродинамический фарадметр

Для непосредственного измерения емкости применяется прибор фарадметр. В нем используется электродинамический логометр. На рис. 5.22 показана схема измерительного механизма электродинамического фарадометра. По двум подвижным катушкам прибора протекают токи  $I_1$  (измеряемого конденсатора) и  $I_2$  (образцового конденсатора). Параметры ветвей подвижных катушек выбраны так, чтобы токи определялись емкостными сопротивлениями:

$$I_1 = U\omega C_x \text{ и } I_2 = U\omega C_0.$$

Поэтому на основе известного принципа действия логометра (§ 5.11.) угол поворота подвижной части прибора:

$$\alpha = \kappa \frac{I_1}{I_2} = \kappa \frac{C_x}{C_0} = \kappa_1 C_x. \quad (5.36)$$

Следовательно, шкалу фарадометра градируют непосредственно в единицах емкости, и при постоянном значении емкости образцового конденсатора  $C_0$  прибор показывает значение  $C_x$ .

На рис. 5.23 приведена схема моста переменного тока для определения параметров индуктивной катушки  $r_x$  и  $L_x$ .

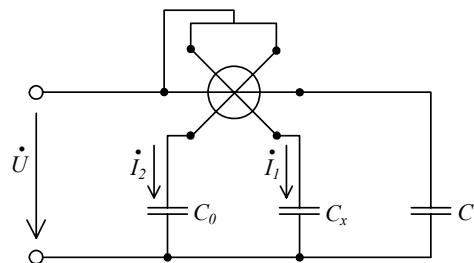


Рис. 5.21. Мост переменного тока для измерения емкости

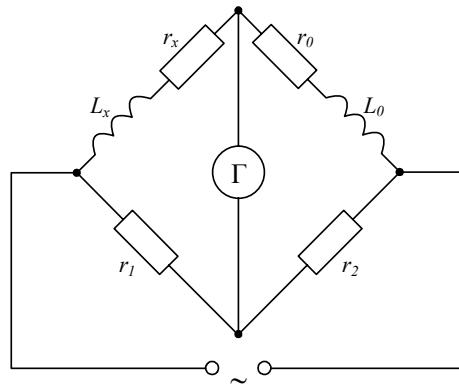


Рис. 5.23. Мост переменного тока для измерения параметров катушки

Пусть  $r_0$  и  $L_0$  – параметры образцовой катушки. С помощью сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  можно добиться равновесия моста. Выразив комплексные сопротивления плеч моста в алгебраической форме:

$$\underline{z}_x = r_x + j\omega L_x; \quad \underline{z}_0 = r_0 + j\omega L_0; \quad \underline{z}_1 = r_1 \quad \text{и} \quad \underline{z}_2 = r_2,$$

запишем уравнение равновесия

$$r_2(r_x + j\omega L_x) = r_1(r_0 + j\omega L_0).$$

Согласно данному равенству, можно порознь приравнять действительные и мнимые части и получить искомые параметры индуктивной катушки:

$$r_x = r_0 \frac{r_1}{r_2} \quad \text{и} \quad L_x = L_0 \frac{r_1}{r_2}.$$

#### 5.14. СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Электрические методы измерения неэлектрических величин широко применяются на практике. Эти методы основаны на преобразовании неэлектрической величины в электрическую с последующим измерением ее электроизмерительными приборами. Следовательно, устройство для измерения неэлектрических величин должно состоять из преобразователя и электроизмерительного прибора, шкала которого проградуирована в единицах измеряемой неэлектрической величины. Преобразователи неэлектрических величин в электрические называются датчиками.

По принципу действия преобразователи или датчики разделяются на две группы: параметрические и генераторные. В параметрических преобразователях неэлектрическая величина изменяет параметры электрической цепи – сопротивление, индуктивность и емкость так, что

каждому значению неэлектрической величины соответствует определенное значение  $r$ ,  $L$  и  $C$ .

Генераторными называются такие преобразователи или датчики, которые преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в ЭДС.

Наиболее распространенными параметрическими датчиками являются:

- реостатные преобразователи, с помощью которых измеряемая неэлектрическая величина, например, линейное или угловое перемещение, воздействует на движок, изменяя его положение и тем самым меняя сопротивление реостата и величину тока в цепи;

- датчики с термопротивлением основаны на свойстве металлического проводника изменять свое сопротивление в зависимости от температуры;

- тензометрические датчики или проволочные преобразователи, основанные на изменении сопротивления константановой проволоки при ее деформации под воздействием механических напряжений, применяются для измерений деформирующих сил;

- емкостные преобразователи, используемые для измерения перемещений, контроля уровня жидкостей, основаны на явлении изменения емкости конденсатора при изменении взаимного расположения обкладок или диэлектрической проницаемости среды;

- индуктивные преобразователи, основанные на изменении индуктивности катушки при перемещении ее сердечника или зазора магнитопровода под действием измеряемой неэлектрической величины: силы, давления, линейного перемещения;

- фотоэлектрические преобразователи, действие которых (сelen, цезий) основано на изменении своего сопротивления под действием света.

К генераторным преобразователям относятся:

- термоэлектрические преобразователи, представляющие собой термопару, в которой, благодаря разности температур спая и свободных концов, создается ЭДС, и они служат для измерения температуры;

- индукционные преобразователи, состоящие из катушки и сердечника, основанные на возникновении ЭДС при их взаимном перемещении, используются для измерения величины перемещения, частоты вращения и т.д.

- пьезоэлектрические преобразователи, в которых используется появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварц, турмалин и пр.) под влиянием механических давлений.

Рассмотрим некоторые простые примеры измерения неэлектрических величин.

При измерении уровня жидкости подвижная часть устройства - поплавок 1 связан с движком реостатного датчика (рис. 5.24). Изменение положения поплавка 1 вызывает перемещение движка 2 реостата 3. Каждому положению уровня жидкости будет соответствовать определенное значение сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  и соответствующее им отношение токов  $\frac{I_1}{I_2}$ , проходящих по катушкам магнитоэлектрического логометра 4. Поэтому шкала логометра может быть отградуирована непосредственно в единицах измеряемого уровня жидкости или объема этой жидкости.

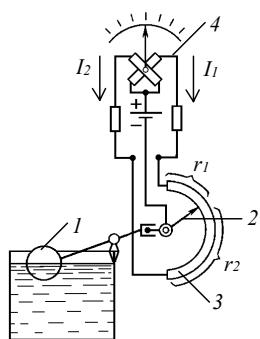


Рис. 5.24. Измерение уровня жидкости реостатным датчиком

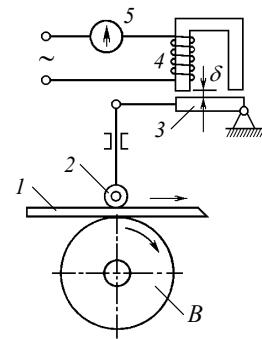


Рис. 5.25. Измерение толщины индуктивным датчиком

Для измерения малых перемещений может быть использован индуктивный преобразователь (рис. 5.25).

В данном случае устройство с индуктивным датчиком используется для контроля толщины ленты, движущейся при вращении вала  $B$ . Принцип действия заключается в следующем. Изменение толщины ленты 1 перемещает ролик 2 и связанный с ним якорь 3 магнитопровода преобразователя. При этом изменяется величина зазора магнитопровода  $\delta$ , что приводит к изменению индуктивного сопротивления обмотки 4 и тока в цепи катушки. Ввиду такой непосредственной связи между толщиной ленты и током прибор - измеритель тока 5 градуируется в единицах, определяющих линейные размеры.

В качестве примера использования генераторного преобразователя рассмотрим принцип действия индукционного тахометра для измерения частоты вращения. Якорь маломощной машины постоянного тока соединяется с валом, частоту вращения которого надо определить.

Известно, что величина ЭДС, индуцированная в обмотке якоря, пропорциональна частоте вращения  $n$  ( $E = C_e n \Phi$ ). Тогда шкала вольтметра, присоединенного к выводам обмотки якоря, может быть отградуирована непосредственно в единицах частоты вращения в об/с или в об/мин.

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В электрической машине осуществляется преобразование механической энергии в электрическую или, наоборот, электрической энергии в механическую. В первом случае машина является генератором, во втором -электрическим двигателем. Электрические машины постоянного тока могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, т.е. обладают свойством обратимости.

Электрические двигатели постоянного тока, по сравнению с двигателями переменного тока, обладают такими преимуществами, как возможность регулирования частоты вращения их в широких пределах, лучшие пусковые качества, развивает большой пусковой момент при относительно небольшом токе. Поэтому они широко применяются в качестве тяговых двигателей на электротранспорте (электропоезда, трамвай, троллейбус и др.), в подъемных кранах.

Маломощные электродвигатели постоянного тока используются в исполнительных звеньях систем автоматики, а специальные генераторы применяются в качестве датчиков частоты вращения в индукционных тахогенераторах.

Генераторы низкого напряжения (6-12 В) применяются для питания электролитических ванн при токах до 10000 А, для зарядки аккумуляторных батарей, высококачественной сварки при напряжении 20-70 В. Питание обмоток возбуждения синхронных генераторов в основном осуществляется от генераторов постоянного тока (возбудителей).

Машины постоянного тока входят в состав автомобильного, судового, авиационного электрооборудования. Диапазон мощностей машин постоянного тока широк - от долей Вт в микромашинах и до сотен кВт используемых в мощных прокатных станах, для привода гребных винтов кораблей и т.д.

При наличии указанных преимуществ перед машинами переменного тока машина постоянного тока имеет существенный недостаток, связанный с наличием у них щеточно-коллекторного узла. При определенных неблагоприятных условиях наблюдается искрение в этом узле, что снижает надежность работы и требует профилактики и постоянного ухода за

машиной. Коллектор усложняет, удорожает конструкцию и эксплуатацию машины по сравнению с бесколлекторной машиной переменного тока. Ввиду искрения коллекторные машины не используются во взрывоопасных средах.

## 6.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 6.2.1. Принцип действия генератора

На рис. 6.1 показана модель простейшего генератора постоянного тока. Она состоит из неподвижной части - постоянного магнита и подвижной части - рамки  $ABC\bar{D}$ , вращающейся между магнитными полюсами.

Концы рамки соединены с пластинами в виде полуколец, которые называют коллекторными пластинами. К коллекторным пластинам прижимаются две неподвижные щетки, к которым подключается внешняя цепь.

Принцип действия генератора объясняется на основе явления электромагнитной индукции.

Рассмотрим это подробно. Если с помощью какого-либо первичного двигателя привести рамку во вращение, например, по движению часовой стрелки, то активные стороны (проводники) рамки  $AB$  и  $C\bar{D}$  начнут пересекать магнитные силовые линии и в них наводятся ЭДС. Направления этих ЭДС определяются по правилу правой руки на основе заданных направлений движения проводника и магнитных силовых линий.

В начальном положении рамки (рис. 6.1, а) ЭДС индуцируется в направлении от  $A$  к  $B$  и от  $\bar{D}$  к  $C$ . Под действием суммарного ЭДС этих проводников рамки ( $e_{AB} + e_{\bar{D}C} = e$ ) по внешней цепи с сопротивлением  $r$  создается ток в направлении от щетки 1 к щетке 2.

В рассматриваемый момент активные проводники пересекают силовые линии магнитного поля перпендикулярно, и скорость изменения магнитного потока через плоскость рамки будет наибольшей, и, следовательно, величины ЭДС и тока будут также равны их наибольшим значениям.

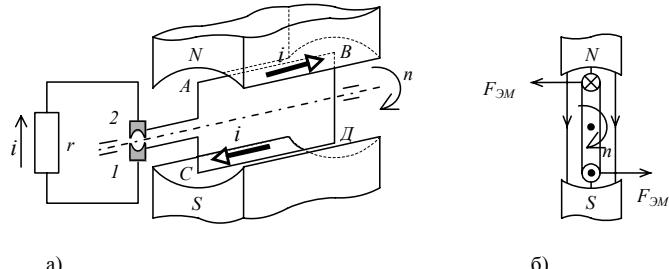


Рис. 6.1. Простейший генератор постоянного тока

При дальнейшем вращении рамки ЭДС начинает убывать. В положении рамки, после ее поворота на  $90^\circ$  относительно начального положения, активные стороны лишь скользят по магнитным силовым линиям, не пересекая их, а скорость изменения магнитного потока через плоскость рамки равна нулю, поэтому значения ЭДС и тока также равны нулю.

Это положение рамки, когда активные стороны не подвергаются влиянию ни северного, ни южного полюсов, считают, что они находятся на геометрической нейтрали машины. Линии симметрии, делящие пространство между магнитными полюсами пополам, называются геометрическими нейтральными линиями (обычно используется понятие «геометрическая нейтраль», имея ввиду одну среднюю из этих линий). А линии, проходящие через точки, где индукция  $B$  в магнитного поля равна нулю, называются линиями физической нейтрали. В данном случае линии геометрической и физической нейтрали совпадают. При дальнейшем повороте рамки, когда сторона  $AB$  попадает в область южного полюса, сторона  $DC$  - в область северного полюса, то направления ЭДС и токов по этим сторонам меняются на обратные, т.е. теперь ЭДС и ток направлены от  $B$  к  $A$  и от  $C$  к  $D$ . Значения этих ЭДС и токов, увеличиваясь, достигают наибольших значений, когда рассматриваемые стороны окажутся против следующих магнитных полюсов.

Таким образом, когда активные стороны рамки расположены против центра магнитных полюсов, значение ЭДС рамки будет наибольшее; когда активные стороны рамки окажутся на геометрической нейтрали машины, ЭДС рамки будет равна нулю. Из сказанного следует, что при вращении рамки в магнитном поле величина и направление ЭДС в ней периодически меняются, т.е. в рамке возбуждается переменная ЭДС.

Для того, чтобы во внешней цепи генератора получать не переменный, а постоянный ток, который имел бы все время одно и то же направление, применяют коллектор (в этом случае коллекторные пластины, как отмечено, имеют вид двух полуколец).

Принцип действия коллектора заключается в том, что в тот момент, когда направления ЭДС и, следовательно, токов в активных сторонах рамки меняются на обратные, одновременно меняются и полукольца под щетками. Таким образом, коллектор не только обеспечивает соединение вращающейся рамки с внешней цепью, но за счет переключения концов рамки создает выпрямление тока, выдаваемого генератором.

В результате такого выпрямления ток по внешней цепи имеет одно постоянное направление, а по величине имеет пульсирующий характер. Графическую зависимость этого тока от времени за один оборот рамки можно показать на рис. 6.2.

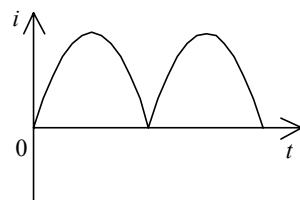


Рис. 6.2. График тока от простейшей модели генератора постоянного тока

В данном случае рассмотренное устройство может быть названо генератором постоянного тока лишь потому, что дает ток постоянный по направлению.

Если вращающуюся часть модели выполнить из двух рамок, установленных на общей оси под углом  $90^\circ$  и из четырех коллекторных пластинок, то степень пульсации тока будет меньше, график показан на рис. 6.3.

Ток во внешней цепи получается в результате накладывания друг на друга токов от двух обмоток, и он имеет форму огибающей от графика отдельных токов. Если усовершенствовать генератор в направлении увеличения рамок, соответственно коллекторных пластинок, то в принципе можно получать ток постоянный и по величине.

В конструкции настоящих генераторов вместо рамок применяются специальные обмотки (рассмотрим далее). Вращающаяся часть машины постоянного тока называется якорем, а ее обмотки - обмоткой якоря. Если воспользоваться правилом левой руки, то при заданных направлениях движения проводника в магнитном поле и тока в нем нетрудно установить, что на стороны действуют электромагнитные силы  $F_{эм}$  (рис. 6.1,б), образующие тормозящий момент, т.е. момент, направленный против вращения якоря генератора. Механическое усилие первичного двигателя преодолевает тормозящий момент и вращает якорь. В результате механическая энергия, подведенная к валу, преобразуется генератором в энергию электрического тока. Для генераторного режима машины можно написать уравнение электрического состояния, учитывая, что возникающая ЭДС  $E$  вызывает ток  $I$  такого же направления, и она должна

компенсировать падение напряжения в обмотке якоря и на нагрузке с сопротивлением  $r$ :

$$E = U + r_g I, \quad (6.1)$$

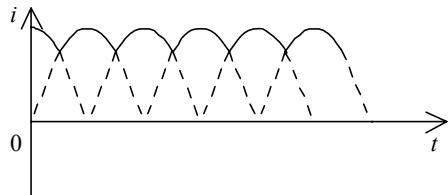


Рис. 6.3. График тока от генератора постоянного тока с двумя рамками

где  $U = rI$  - напряжение на зажимах генератора или приемника;  
 $r_g$  - сопротивление цепи якоря.

#### 6.2.2. Принцип действия двигателя

То же устройство (рис. 6.1) работает в режиме электрического двигателя (рис. 6.4), если к щеткам подвести постоянное напряжение от сети.

Направление вращения рамки (якоря) принято для сравнения режимов такое же, как и в случае генератора. Направление тока по рамке, как указано на рис. 6.4,а, обеспечивает принятое направление вращения рамки. Известно, что на проводник с током в магнитном поле, по закону Ампера, действует электромагнитная сила  $F_{\text{ЭМ}}$ , направление которой определяется по правилу левой руки. Пара этих сил создает врачающий момент  $M_{\text{ср}}$  (рис. 6.4,б), т.е. электрическая энергия преобразуется в механическую энергию вращения якоря.

Необходимо заметить, что при переходе сторон рамки  $AB$  и  $CD$  из области одного магнитного полюса в область другого за счет переключения коллекторных пластин из одной щетки на другую, направление тока в них меняется на обратное, и направление врачающего момента  $M_{\text{ср}}$  остается постоянным.

При вращении рамки (обмотки якоря) в ней возникает ЭДС, согласно правилу правой руки, она будет направлена против тока, протекающего по обмотке двигателя. Поэтому эту ЭДС называют противо-ЭДС. Для двигательного режима машины эта ЭДС должна быть меньше напряжения сети  $U$  на величину падения напряжения на сопротивлении обмотки якоря  $r_g$ . Тогда уравнение электрического состояния машины в двигательном режиме имеет вид:

$$U = E + r_g I, \quad (6.2)$$

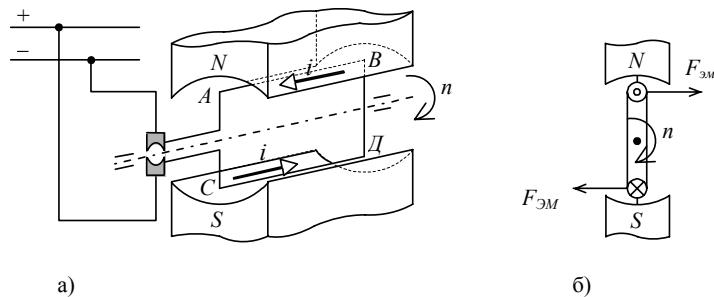


Рис. 6.4. Модель двигателя постоянного тока

где  $U$  - напряжение сети;  $E$  - противо-ЭДС.

Сравнивая генераторный и двигательный режимы машины постоянного тока, можно заключить, что в случае генератора имеет место: преобразование механической энергии в электрическую энергию постоянного тока, электромагнитный момент является тормозным, направление ЭДС и тока совпадают, величина ЭДС больше напряжения на нагрузке на величину падения напряжения на сопротивлении обмотки якоря  $r_a I$ .

А в случае двигателя имеет место: преобразование электрической энергии постоянного тока в механическую, электромагнитный момент является врачающим, направления ЭДС и тока противоположны, величина напряжения, подводимого к двигателю, больше значения ЭДС на величину падения напряжения на сопротивлении обмотки якоря  $r_a I$ .

### 6.2.3. Устройство машины постоянного тока

Машина постоянного тока состоит из двух основных частей: неподвижной - статора и вращающейся - якоря. Эскиз машины постоянного тока показан на рис. 6.5.

Статор состоит из станины 1, главных магнитных полюсов 2, дополнительных полюсов 3. Якорь машины состоит из стального сердечника 4 с обмоткой, уложенной в его пазах, и коллектора 5.

Неподвижные щетки 6 устанавливаются и закрепляются в щеткодержателях. Для обеспечения надежного контакта с коллекторными пластинами щетки прижимаются к ним пружинами.

Главный магнитный полюс состоит из стального сердечника с его обмоткой 7 и полюсным наконечником.

При прохождении по этой обмотке постоянного тока возбуждается основное магнитное поле машины, поэтому эта обмотка называется обмоткой возбуждения. В машинах малой мощности в качестве полюсов могут использоваться постоянные магниты. Дополнительные полюсы устанавливаются между главными и служат для улучшения работы машин при их мощности, превышающей порядка 1 кВт. Число дополнительных полюсов обычно равно числу главных. Конструктивно они выполняются как и главные, но бывают значительно меньших размеров. В зависимости от мощности и напряжения машины могут иметь не два, как показано на рис. 6.5, а большее число полюсов.

Обмотки якоря бывают разных типов, они укладываются в пазы наружной поверхности цилиндрического сердечника якоря, и ее выводы соединяются с коллекторными пластинами. Обмотки машины выполняются обычно из медного провода с изоляцией. Коллектор машины является весьма ответственной и в конструктивном отношении довольно сложной частью. Он состоит из ряда медных пластин, изолированных друг от друга мicanитом, образующими в сборе цилиндр, который крепится на валу якоря.

Сердечники полюсов и якоря машины для уменьшения потерь на вихревые токи изготавливают не цельными, а из отдельных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. Сердечники выполняют функцию магнитопровода. Магнитный поток, возбуждаемый полюсами, проходит и замыкается через сердечники полюсов, якоря и станину машины (на рис. показан пунктиром).

Дуга между осями соседних основных магнитных полюсов называется полюсным делением. Она обозначается буквой  $\tau$  и может выражаться в градусах, радианах.

### 6.3. ЭДС ЯКОРЯ

Изучение машин постоянного тока целесообразно начать с рассмотрения простейших машин. В 80-х годах прошлого столетия была

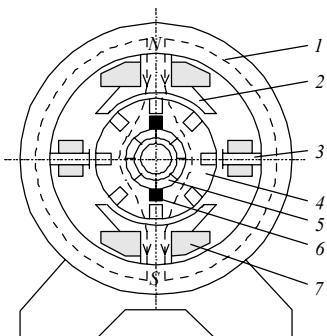


Рис. 6.5. Эскиз машины постоянного тока

изобретена машина с кольцевым якорем, рис. 6.6. Следует отметить, что такая машина из-за технического несовершенства не нашла практического внедрения. Однако по принципу действия эта машина не отличается от современной. Наглядность ее конструкции позволяет в более доступной форме изложить и рассмотреть, в частности, вопрос о возбуждении ЭДС в обмотке якоря.

Машина с кольцевым якорем имеет цилиндрический корпус 1, на внутренней поверхности которого укреплены магнитные полюсные наконечники 2. Якорь машины представляет собой стальное кольцо 3 со спиральной обмоткой 4 из изолированного провода. Такой якорь называют кольцевым.

Сpirальная обмотка якоря образует замкнутую цепь. Машина не имеет коллектора. Для создания электрического контакта подвижной обмотки якоря с внешней электрической цепью ее наружная поверхность защищена от изоляции и на нее наложены щетки 5. Один из недостатков машины - это быстрый износ труящихся частей: проводов обмотки и щеток.

Рассмотрим возникновение ЭДС якоря в режиме генератора. Пусть якорь машины приводится во вращение в направлении движения часовой стрелки с постоянной частотой  $n$ . Тогда проводники обмотки, расположенные на внешней поверхности кольцевого якоря, будут пересекать магнитные силовые линии и в них наводятся ЭДС. Эти проводники называются активными проводниками.

В проводниках обмотки, расположенных на внутренней и торцовых сторонах якоря, ЭДС наводиться не будет, так как они не пересекают магнитных силовых линий. Эти проводники служат только для последовательного соединения активных проводников. Их называют соединительными проводниками. Таким образом, менее половины общей длины обмотки якоря приходится на активную часть, что является также недостатком конструкции такой машины.

Направления ЭДС, возникающих в активных проводниках, определяются по правилу правой руки на основе заданных направлений магнитных силовых линий и движения проводников. Можно убедиться, что

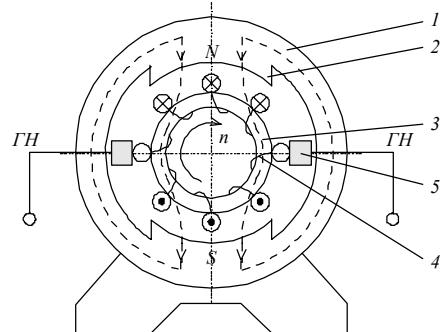


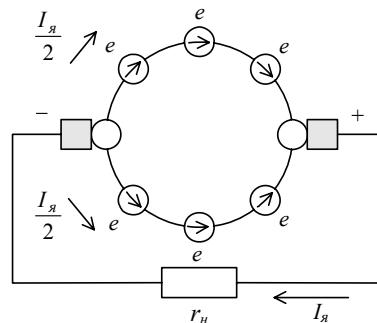
Рис. 6.6. Машина постоянного тока с кольцевым якорем

направления ЭДС во всех проводниках, движущихся в зоне северного полюса, будут одинаковыми - они направлены «от нас» и отмечены крестиками. А в проводниках, расположенных ниже геометрической нейтрали и движущихся в зоне южного полюса, возникают ЭДС, имеющие направления «к нам», что условно эти направления обозначены точками.

В момент перехода активных проводников линию геометрической нейтрали (в местах установки щеток) ЭДС в них, согласно отмеченному выше, наводиться не будет.

Щетки, наложенные на якорь, делят его обмотку на две параллельные ветви с одинаковым числом последовательно соединенных активных проводников. Необходимо отметить, что число пар магнитных полюсов  $p$  определяет число пар параллельных ветвей  $a$ . В данном случае  $p = 1$  и  $a = 1$ . Обозначив активные проводники с ЭДС, как отдельные источники ЭДС, можно представить генератор постоянного тока в виде электрической схемы замещения, рис. 6.7.

Рис. 6.7. Электрическая схема замещения генератора постоянного тока



ЭДС в каждом активном проводнике вращающейся обмотки является переменной. Среднее значение ЭДС проводника  $e$  при его перемещении в пределах полюсного деления  $\tau$  можно выразить через среднее значение магнитной индукции  $B_{cp}$ :

$$e = B_{cp} lu, \quad (6.3)$$

где  $l$  - активная длина проводника;

*и* - линейная скорость перемещения проводника при вращении якоря.

Если обмотка якоря имеет  $N$  активных проводников и  $2a$  параллельных ветвей, то число последовательно соединенных проводников с ЭДС  $e$  в каждой параллельной ветви будет  $\frac{N}{2a}$ . Тогда величина ЭДС машины или обмотки якоря равна:

$$E = \frac{N}{2a} B_{cp} lu \quad (6.4)$$

Среднее значение магнитной индукции можно выразить через магнитный поток одного полюса  $\Phi$ , диаметр якоря  $D$  и число полюсов  $2p$  ( $p$  - число пар полюсов):

$$B_{cp} = \frac{\Phi 2p}{\pi Dl}, \quad (6.5)$$

где  $\Phi 2p$  - магнитный поток всех главных полюсов;

$\pi Dl$  - наружная поверхность якоря в пределах длины проводника  $l$ .

При частоте якоря  $n$  (об/мин) линейную скорость можно определить:

$$u = \frac{\pi Dn}{60} \quad (6.6)$$

Учитывая два последних выражения, получим формулу ЭДС якоря машины постоянного тока:

$$E = \frac{N}{2a} \frac{\Phi 2p}{\pi Dl} l \frac{\pi Dn}{60} = \frac{pN}{60a} n\Phi = C_e n\Phi,$$

где  $C_e = \frac{pN}{60a}$  - коэффициент ЭДС, зависящий от конструкции машины.

Таким образом, ЭДС обмотки якоря пропорциональна частоте вращения якоря и магнитному потоку главных полюсов машины:

$$E = C_e n\Phi \quad (6.7)$$

Эта формула применима для определения ЭДС как генераторов, так и двигателей.

#### 6.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Известно, что на проводник длиной  $l$ , с током  $I$  в магнитном поле с индукцией  $B$  действует электромагнитная сила, выражаемая формулой:

$$F = BIl \quad (6.8)$$

При вращении якоря сила, действующая на проводник, изменяется. Среднее значение этой силы за время прохождения проводника через зону одного полюса можно выразить через среднее значение магнитной индукции:

$$F_{cp} = B_{cp} l \frac{I_a}{2a}, \quad (6.9)$$

где  $I_a$  - ток якоря;  $\frac{I_a}{2a}$  - ток через одну из параллельных ветвей.

Общая сила, действующая на  $N$  проводников якоря, создает электромагнитный момент:

$$M = F_{cp}N \frac{D}{2}, \quad (6.10)$$

где  $\frac{D}{2}$  - плечо силы или радиус якоря.

Последнее выражение можно представить с учетом тока якоря и магнитного потока, тогда

$$M = B_{cp}l \frac{I_a}{2a} N \frac{D}{2}. \quad (6.11)$$

После замены магнитной индукции  $B_{cp}$ , согласно выражения, полученного в предыдущем параграфе, имеем:

$$M = \frac{\Phi 2p}{\pi Dl} l \frac{I_a}{2a} N \frac{D}{2} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_M \Phi I_a,$$

где  $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$  - коэффициент момента, зависящий от конструкции машин.

Таким образом, электромагнитный момент

$$M = C_M \Phi I_a \quad (6.12)$$

пропорционален магнитному потоку машины и току якоря.

Для генераторов этот момент является, как было отмечено, противодействующим, а для двигателей - вращающим.

#### 6.5. ТИПЫ ОБМОТОК ЯКОРЯ

У современных машин постоянного тока все проводники обмотки якоря являются активными: все они участвуют в создании ЭДС.

Проводники обмотки располагаются в пазах на наружной поверхности сердечника якоря в виде отдельных секций, концы которых присоединяются к коллекторным пластинам, расположенным рядом. Для того, чтобы ЭДС в сторонах секции суммировались, стороны каждой секции располагают под полюсами различной полярности на расстоянии, равном полюсному делению  $\tau$ .

Типы обмоток по принципу построения делятся на петлевые и волновые. На рис. 6.8 показана секция петлевой обмотки.

Количество секций определяется геометрическими размерами якоря.

Рассмотрим некоторые параметры, определяющие принцип построения петлевой обмотки.

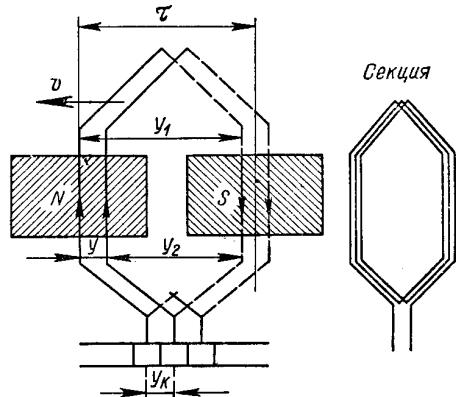


Рис. 6.8. Петлевая обмотка якоря

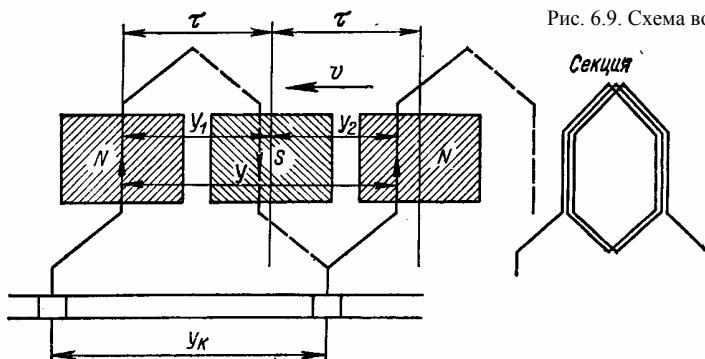


Рис. 6.9. Схема волновой обмотки

Шагом по коллектору  $Y_k$  называется расстояние между центрами двух соседних коллекторных пластин.  $Y_1$  и  $Y_2$  - первый и второй частичные шаги обмотки,  $Y = Y_1 - Y_2$  - результирующий шаг.

Число пар щеток определяется числом пар полюсов  $p$  или числом пар параллельных ветвей  $a$ . Щетки одинаковой полярности, находящиеся против одноименных полюсов, объединяются и соединяются с выводными зажимами машины.

На рис. 6.9 показана секция волновой обмотки.

Отличительной особенностью волновой обмотки является то, что независимо от числа полюсов машины она имеет всего две параллельные ветви. Множественная волновая обмотка получается путем укладки на якоре  $m$  простых, как показано на рис. 6.9, волновых обмоток.

Простые волновые обмотки применяются для машин малой мощности. Для машин средней и большой мощностей обычно используются петлевые и множественные волновые обмотки

## 6.6. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

При работе машины постоянного тока под нагрузкой магнитное поле тока якоря оказывает воздействие на магнитное поле полюсов. Это явление носит название реакции якоря.

На рис. 6.10 показаны картины магнитных полей генератора с кольцевым якорем: а - магнитное поле полюсов; б - магнитное поле тока якоря; в - результирующее поле, полученное в результате наложения этих полей.

Основное магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения или магнитный поток полюсов (рис. 6.10,а), является симметричным относительно оси главных полюсов. Этот случай соответствует режиму холостого хода машины, т.е. ток якоря отсутствует, в машине имеется

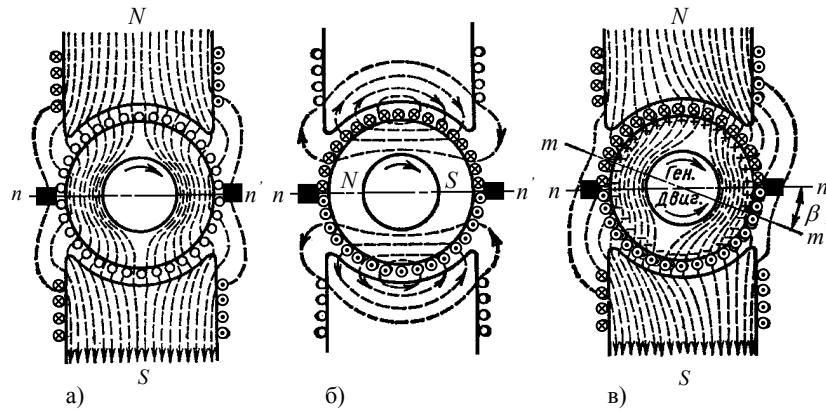


Рис. 6.10. Картины магнитных полей

единственное поле главных полюсов  $N, S$ .

Когда генератор работает с нагрузкой, по обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле (рис. 6.10,б), называемое полем якоря. Ось этого магнитного поля совпадает с геометрической нейтралью  $nn'$ , и является поперечной или перпендикулярной к оси главных полюсов. Поэтому часто влияние данного поля на общее поле машины называют поперечной реакцией якоря.

Направление магнитного поля тока якоря определяется с помощью известного правила буравчика или правоходового винта.

Рассматривая рис. 6.10, а и б, можно установить, что магнитный поток тока якоря ослабляет магнитный поток полюса под набегающим его концом (рис. 6.10,в), так как он имеет направление, противоположное направлению магнитных силовых линий полюса, а под сбегающим его концом (верхний правый край), наоборот, настолько же усиливает его.

Таким образом, под одним краем полюса результирующий магнитный поток увеличивается по сравнению с основным магнитным потоком полюса, а под другим краем - уменьшается. В итоге результирующее поле получается несимметричным по отношению к осевой линии полюсов (рис. 6.10,в), и физическая нейтраль  $mm'$  поворачивается на угол  $\beta$  по отношению к геометрической нейтрали  $nn'$ . У генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а у двигателя - против вращения.

В результате реакции якоря магнитная индукция в зазоре машины становится еще более неравномерной.

Смещение физической нейтрали вызывает нежелательные последствия, приводящие к ухудшению работы генератора: уменьшается ЭДС машины, так как в одной ветви окажутся проводники с противоположными направлениями ЭДС; щетки, касающиеся проводников теперь с ЭДС, отличными от нуля, приводят к искрению и обогранию коллекторных пластин.

От указанных нежелательных явлений можно избавиться, если переместить щетки по коллектору на угол  $\beta$ , т.е. перевести с геометрической нейтрали  $nn'$  на физическую нейтраль  $mm'$ .

Нежелательное последствие реакции якоря особенно заметно при больших токах якоря, когда наступает насыщение магнитной цепи. В этом случае увеличение магнитного потока под одним краем полюса будет меньшим, чем уменьшение – под другим. Это размагничивающее действие реакции якоря будет причиной дополнительного снижения ЭДС якоря.

Если учесть, что положение физической нейтрали изменяется с изменением нагрузки, то полностью ликвидировать искрение в щеточно-коллекторном узле с помощью перемещения щеток не удается.

В машинах средней и большой мощностей применяют компенсационную обмотку, расположенную в пазах главных полюсов и включаемую последовательно с обмоткой якоря так, чтобы ее магнитный поток был противоположен магнитному потоку якоря.

## 6.7. КОММУТАЦИЯ

Коммутацией в электрических машинах постоянного тока называется процесс переключения секции обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и связанные с этим явления.

На рис. 6.11,а показана секция перед коммутацией, на рис. 6.11,б – секция в процессе коммутации, на рис. 6.11,в – секция после коммутации.

Процесс переключения секции происходит довольно быстро. Время коммутации – продолжительность происходящих электромагнитных явлений, связанных с переключением секции, называется периодом коммутации и составляет порядка  $10^{-4}$  с.

Рассмотрим процесс коммутации в секции из проводников 1, 4 и коллекторных пластин 1, 2. Перед коммутацией щетка касается пластины коллектора 1, и ток якоря  $I_a$  разветвляется, образуя токи по параллельным ветвям  $I_a$  (рис. 6.11,а).

Якорь вращается в указанном направлении с линейной скоростью  $u$ .

С момента касания щетки к пластине 2 начинается процесс коммутации в рассматриваемой секции и будет продолжаться, пока щетка не сойдет с пластины 1. В течение всего периода коммутации эта секция будет замкнута накоротко щеткой (рис. 6.11,б).

Сравнивая моменты до и после коммутации (рис. 6.11,а и в), можно убедиться, что за время коммутации ток в секции меняет свое направление на противоположное от  $+I_a$  до  $-I_a$ . Вследствие изменения тока в секции наводится ЭДС самоиндукции  $e_L = -L \frac{di}{dt}$ . Кроме того, в секции возникает

ЭДС  $e_u = B_n l u$ , вызываемая вращением секции в магнитном поле поперечной реакции якоря. Эта ЭДС  $e_u$  называется ЭДС вращения, где  $B_n$  – индукция поперечного поля.

Обе ЭДС создают в коммутируемой секции дополнительный ток  $I_{don}$ , который, складываясь с током якоря, создает увеличение плотности тока под сбегающим краем щетки, а это приводит к искрению под щеткой, особенно интенсивному в момент размыкания секции.

Для улучшения коммутации машины мощностью 1 кВт и более снабжаются дополнительными полюсами. С помощью дополнительных полюсов в зоне коммутации создается ЭДС, компенсирующая ЭДС  $e_L$  и  $e_u$ .

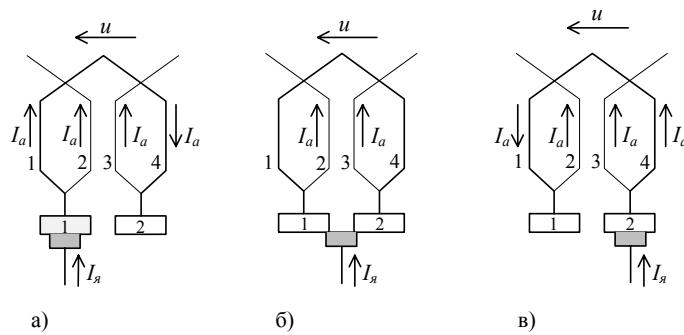


Рис. 6.11. Процесс коммутации секции обмотки якоря

#### **6.8. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ**

Генераторы постоянного тока в зависимости от способа питания обмотки возбуждения различаются на генераторы с независимым возбуждением и самовозбуждением.

При независимом возбуждении генератора его обмотка возбуждения питается от постороннего источника постоянного тока, это усложняет его использование, и поэтому он применяется редко.

Широкое применение на практике получили генераторы с самовозбуждением, где обмотки возбуждения питаются от самого генератора. В зависимости от способа соединения этих обмоток с обмоткой якоря они разделяются на генераторы с параллельным, последовательным и смешанным возбуждениями.

### 6.8.1. Характеристики генераторов

Режим работы генератора постоянного тока характеризуется величиной ЭДС якоря  $E$ , напряжением на зажимах  $U$ , частотой вращения якоря  $n$ , током в обмотке якоря  $I_a$  и током возбуждения  $I_b$ .

Для изучения работы генератора в различных его режимах необходимо построить характеристики, каждая из которых представляет собой зависимость между двумя из указанных выше величин при условии, что остальные остаются постоянными. Наибольший практический интерес представляют характеристики, соответствующие тем условиям, в которых машина находится в эксплуатации.

Такими характеристиками для генераторов являются:

1) характеристика холостого хода - зависимость ЭДС якоря от тока возбуждения при отсутствии нагрузки и при постоянной частоте вращения:  $E = f(I_b)$  при токе нагрузки, равном нулю, т.е.  $I = 0$  и  $n = const$ ;

2) внешняя характеристика - зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянстве частоты вращения и неизменном токе возбуждения (для независимого возбуждения) или неизменном сопротивлении цепи возбуждения (при самовозбуждении):

$U = f(I)$  при  $n = const$  и  $I_b = const$  или  $r_b + r_p = const$ ,

где  $(r_b + r_p)$  - сопротивление цепи возбуждения  $r_b$  с учетом сопротивления реостата  $r_p$ ;

3) регулировочная характеристика - зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянной частоте вращения и постоянном напряжении на зажимах генератора  $I_b = f(I)$  при  $n = const$  и  $U = const$ .

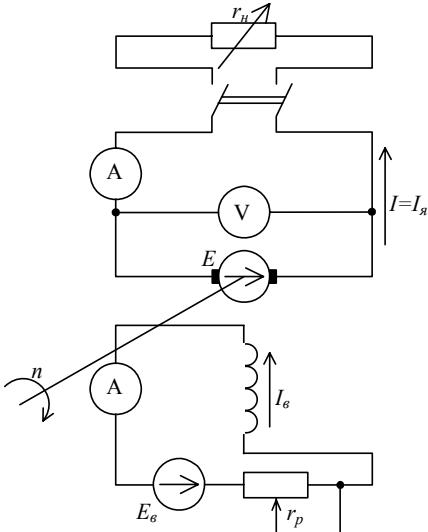
### 6.8.2. Генераторы независимого возбуждения

Схема генератора независимого возбуждения приведена на рис. 6.12. Обмотка возбуждения генератора, как было отмечено, питается от постороннего источника, поэтому ток возбуждения генератора не зависит от тока нагрузки и напряжения на ее зажимах.

В цепи возбуждения имеется источник постоянного тока с ЭДС  $E_b$ . Величина тока возбуждения  $I_b$ , проходящего через обмотку возбуждения, регулируется реостатом  $r_p$ .

Мощность, необходимая для цепи возбуждения, составляет порядка 1–3% от номинальной мощности генератора. Это дает возможность достаточно экономично осуществить регулирование ЭДС  $E$  генератора.

Рис. 6.12. Схема генератора независимого возбуждения



Характеристику холостого хода снимают при отключенной нагрузке, регулируя величину тока возбуждения. С изменением тока возбуждения изменяется магнитный поток  $\Phi$  и, следовательно, ЭДС, согласно формулы  $E = C_e n \Phi$ .

При отсутствии тока возбуждения ( $I_b = 0$ ) ЭДС  $E$  не равна нулю, она имеет незначительную величину  $E_{ocm}$  (остаточная ЭДС), которая наводится за счет остаточной магнитной индукции в стали полюсов.

Ввиду того, что зависимость между потоком  $\Phi$  и током возбуждения  $I_b$  определяется кривой намагничивания стали, то характеристика холостого хода имеет вид этой кривой (рис. 6.13): в начальный период, пока нет насыщения стального сердечника, с увеличением тока возбуждения величина ЭДС растет пропорционально, а с началом насыщения сердечника рост величины ЭДС замедляется.

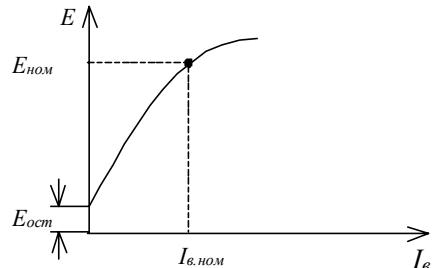


Рис. 6.13. Характеристика холостого хода генератора независимого

Данная характеристика обычно представляет собой узкую петлю гистерезиса, так как магнитная цепь машины выполнена из магнитомягкого материала. Приближенно ее представляют одной кривой.

Генератор должен работать в области магнитного насыщения, чтобы исключить резкое изменение ЭДС при небольших изменениях тока возбуждения. Поэтому машина рассчитывается таким образом, чтобы в номинальном режиме рабочая точка ( $I_{e,nom}, E_{nom}$ ) находилась в середине «колена» кривой  $E = f(I_e)$ .

Внешняя характеристика  $U = f(I)$  (рис. 6.14, кривая 1) снимается при изменении величины сопротивления нагрузки  $r_n$  и когда с помощью реостата  $r_p$  поддерживают ток возбуждения постоянным по величине, равным его номинальному значению.

Напряжение

$$U = E - r_n I$$

при увеличении тока нагрузки от 0 до номинального значения плавно уменьшается в основном из-за падения напряжения на сопротивлении якоря  $r_n I$ . Уменьшение напряжения при переходе от холостого хода к полной нагрузке составляет обычно для генераторов средней мощности 5–10% номинального напряжения  $U_{nom}$ .

Регулировочная характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения при изменении тока нагрузки, чтобы при постоянной частоте вращения якоря напряжение оставалось постоянным.

Так как при неизменном токе возбуждения с увеличением тока нагрузки напряжение на нагрузке уменьшается, то для поддержания его постоянным надо увеличивать ЭДС  $E$  путем увеличения тока возбуждения  $I_e$  (рис. 6.15).

### 6.8.3. Генераторы с самовозбуждением

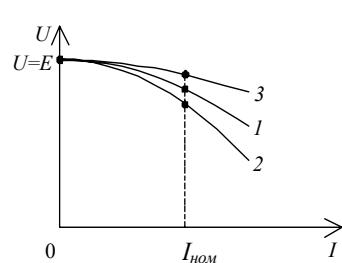


Рис. 6.14. Внешняя характеристика генератора независимого - 1, параллельного - 2, смешанного - 3 возбуждений

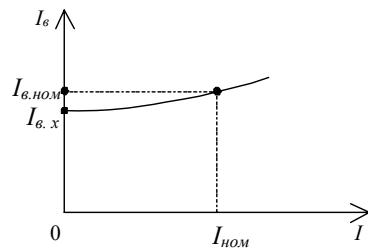


Рис. 6.15. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

Рассмотрим условие самовозбуждения на примере генератора параллельного возбуждения (рис. 6.16).

Процесс самовозбуждения основан на наличии остаточной намагнченности ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь машины. При испытаниях машин на заводе-изготовителе магнитная цепь намагничивается и сохраняет некоторый остаточный поток  $\Phi_{ocm}$ , значение которого составляет 2–3% от номинального основного магнитного потока. Самовозбуждение осуществляется на холостом ходу. При вращении якоря за счет остаточного потока  $\Phi_{ocm}$  наводится небольшая остаточная ЭДС

$$E_{ocm} = C_e n \Phi_{ocm}.$$

Под действием этой ЭДС по контуру, включающему сопротивления  $r_a$ ,  $r_b$ ,  $r_p$ , возникает ток возбуждения:

$$I_{b.ocm} = \frac{E_{ocm}}{r_a + r_b + r_p}$$

Этот ток возбуждает дополнительный магнитный поток  $\Delta\Phi$ . Если обмотка возбуждения включена так, что эти потоки  $\Phi_{ocm}$  и  $\Delta\Phi$  совпадают по направлению, то имеет место усиление результирующего потока  $\Phi$  и соответственно ЭДС якоря  $E$ . Вследствие этого возрастает ток возбуждения от  $I_{b.ocm}$  до значения  $I_b$ , соответствующего его номинальному значению.

В генераторе параллельного возбуждения ток якоря  $I_a$ , разветвляясь, образует ток возбуждения  $I_b$  и ток нагрузки  $I$ . Сопротивление цепи возбуждения имеет достаточно большое значение, и ток возбуждения составляет 1–3% от тока якоря, поэтому практически можно принять  $I_a = I$ .

У рассматриваемого генератора характеристики холостого хода и

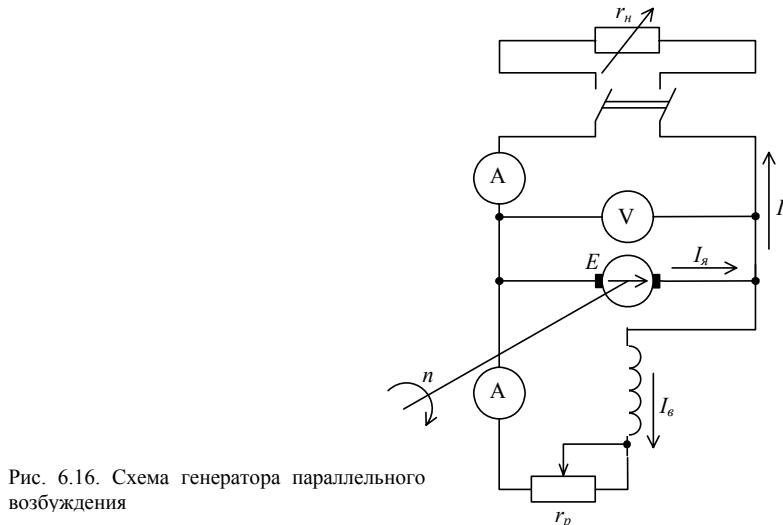


Рис. 6.16. Схема генератора параллельного возбуждения

регулировочная имеют такой же вид, как у генератора независимого возбуждения.

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением отличается от внешней характеристики генератора независимого возбуждения более резким снижением кривой (рис. 6.14, кривая 2).

Внешняя характеристика определяется уравнением

$$U = E - r_a I_a ,$$

из которого видно, что с увеличением тока  $I \approx I_a$  напряжение  $U$  уменьшается. А это приводит к уменьшению тока возбуждения

$$I_b = \frac{U}{r_b} ,$$

что в свою очередь приводит к снижению основного магнитного потока  $\Phi$  и величины ЭДС якоря

$$E = C_e n \Phi$$

Поэтому уменьшение напряжения при увеличении тока нагрузки от нуля до его номинального значения может составлять 8–15% от номинального напряжения, что несколько больше, чем у генератора независимого возбуждения.

В генераторе с последовательным возбуждением обмотка якоря соединена последовательно с обмоткой возбуждения, благодаря чему, ток якоря является током возбуждения и током нагрузки (рис. 6.17).

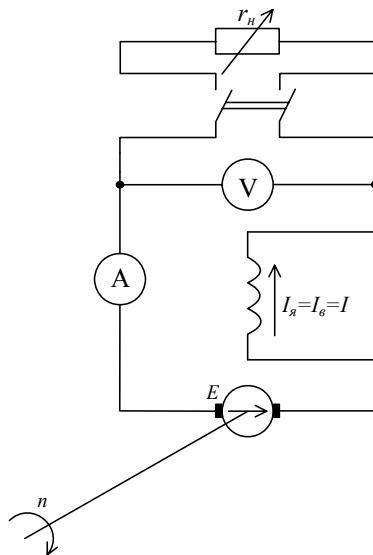
Обмотка возбуждения такого генератора, рассчитанная на большой ток якоря, выполняется малым числом витков и с малым сопротивлением.

У такого генератора с последовательным возбуждением отсутствуют характеристики холостого хода и регулировочная. А внешняя характеристика весьма нестабильна (рис. 6.18).

Напряжение сначала возрастает с увеличением тока нагрузки. Затем вид характеристики начинает изменяться из-за магнитного насыщения магнитопровода машины и после резко снижается из-за размагничивающего действия реакции якоря.

Ввиду непостоянства напряжения генераторы с последовательным возбуждением практически не применяются.

Рис. 6.17. Схема генератора с последовательным возбуждением



Генератор со смешанным возбуждением имеет две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную (рис. 6.19).

Так как при холостом ходе обмотка последовательного возбуждения не принимает участия в образовании магнитного потока, то характеристика холостого хода генератора смешанного возбуждения не отличается от характеристики генератора параллельного и независимого возбуждений.

Как правило, параллельная обмотка является основной, а последовательная - дополнительной, причем обе обмотки включаются так, чтобы их магнитные потоки складывались.

Последовательная обмотка рассчитывается обычно так, что ее магнитный поток компенсирует падение напряжения, в результате чего напряжение на зажимах генератора остается почти постоянным при различных значениях нагрузки. Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением дана в сравнении с внешними характеристиками

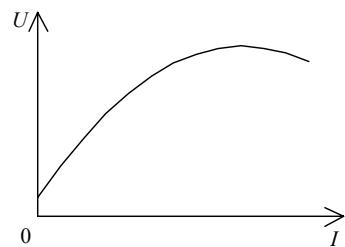


Рис. 6.18. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением

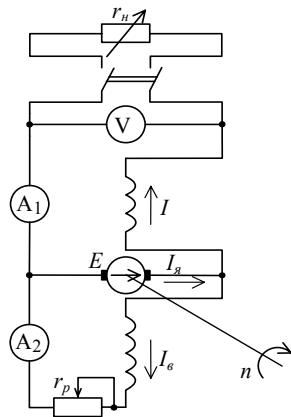


Рис. 6.19. Схема генератора со смешанным возбуждением

генераторов независимого и параллельного возбуждений (рис. 6.14, кривая 3).

Регулировочная характеристика этого генератора аналогична соответствующим характеристикам генераторов независимого и параллельного возбуждений.

#### 6.9. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для обеспечения бесперебойности снабжения электрической энергией, рационального использования мощности и т.п. целесообразно питать нагрузку от двух или более параллельно работающих генераторов.

Рассмотрим условия параллельной работы генераторов.

Пусть включаются параллельно два генератора с параллельными возбуждениями (рис. 6.20).

Допустим, что генератор  $\Gamma_1$  обеспечивает в сеть напряжение  $U$ . Тогда условиями включения генератора  $\Gamma_2$  в сеть являются следующие.

В режиме холостого хода, т.е. до включения генератора  $\Gamma_2$  надо добиться, чтобы его ЭДС  $E_2$  была равна по величине напряжению сети  $U$ . Для чего, как известно, имеются два способа регулирования величины ЭДС: изменением частоты вращения  $n_2$  первичного двигателя или изменением тока возбуждения  $I_{e2}$ . Обычно при постоянстве частоты вращения  $n_2 = \text{const}$  регулировки ЭДС добиваются изменением тока  $I_{e2}$ .

Затем надо обеспечить соответствие полярностей включаемого генератора  $\Gamma_2$  с сетью. Для этой цели служит контрольный вольтметр  $V_k$ . Если его показание равно нулю, то вольтметр включен к одноименным полюсам и можно включить генератор  $\Gamma_2$  в сеть замыканием однополюсного рубильника.

После такого включения генератор  $G_2$  будет работать в режиме

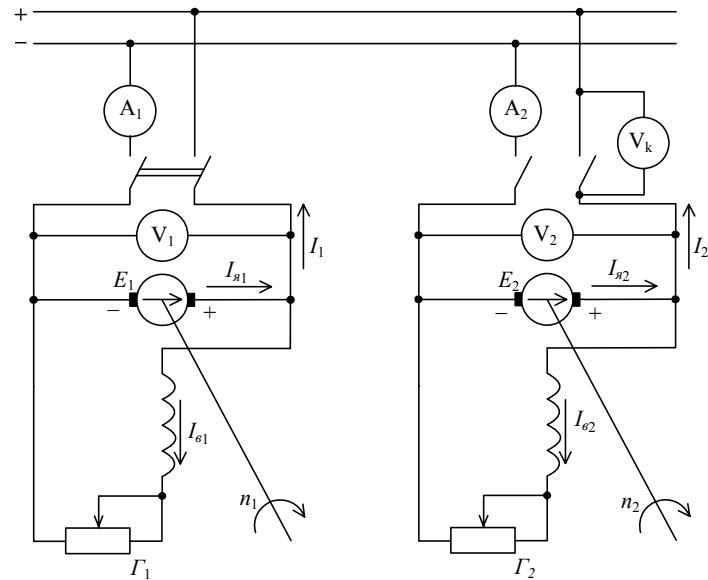


Рис. 6.20. Схема включения генераторов постоянного тока на параллельную работу

холостого хода, т.к. по условию  $E_2 = U$  и

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{r_{g2}} = 0.$$

Чтобы нагружать второй генератор (отдавал энергию в сеть), нужно увеличить ЭДС  $E_2$  посредством увеличения тока возбуждения  $I_{g2}$ .

При параллельной работе генераторов распределение нагрузки между ними зависит от их внешних характеристик.

При одинаковых внешних характеристиках нагрузка распределяется пропорционально номинальным мощностям генераторов, а при разных - генератор с меньшим падением напряжения нагружается больше, чем

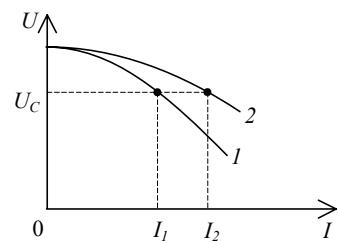


Рис. 6.21. Распределение нагрузочных токов между генераторами, включенными на параллельную работу, в зависимости от их внешних характеристик

другой, у которого падение напряжения больше (рис. 6.21).

#### 6.10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принцип действия двигателя постоянного тока рассмотрен в § 6.22.

Как и генераторы, двигатели постоянного тока подразделяются в зависимости от способа соединения обмотки якоря с обмотками возбуждения. Двигатели самовозбуждения различаются на двигатели с параллельным, последовательным и смешанным возбуждениями.

##### 6.10.1. Пуск в ход двигателей постоянного тока

В момент подключения двигателя к сети частота вращения  $n=0$ , поэтому ЭДС якоря также равна нулю, т.е.  $E = C_e n \Phi = 0$ . Из уравнения электрического состояния двигателя (6.2) пусковой ток якоря равен:

$$I_{я,n} = \frac{U - E}{r_я} = \frac{U}{r_я}.$$

Сопротивление обмотки якоря величина малая, порядка  $10^{-1}$  Ома, тогда при номинальном напряжении сети  $U$  пусковой ток якоря  $I_{я,n}$  превышает номинальное его значение в 10–20 раз.

Протекание по обмотке якоря такого большого тока может привести к таким нежелательным случаям, как, например, разрушение щеточно-коллекторного узла и пр.

Для ограничения пускового тока последовательно с обмоткой якоря включают пусковой реостат  $r_n$  (рис. 6.22).

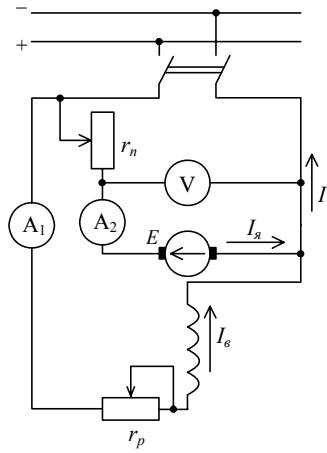
Сопротивление пускового реостата не должно допускать превышение тока якоря относительно его номинального значения в 1,5–2 раза. Тогда пусковой ток равен:

$$I_{я,n} = \frac{U}{r_я + r_n}.$$

В момент пуска сопротивление пускового реостата  $r_n$  имеет наибольшее значение, по мере разгона двигателя сопротивление уменьшают и по окончании разгона реостат выводится полностью.

Чтобы при пуске двигатель обеспечить номинальным током возбуждения, обмотка возбуждения включается непосредственно к сети, т.е. к точке до пускового реостата.

Рис. 6.22. Схема двигателя параллельного возбуждения с пусковым реостатом  $r_n$



### 6.10.2. Саморегулирование двигателей

Все электрические двигатели в допустимых пределах обладают свойством саморегулирования, которое заключается в создании вращающего момента  $M_{sp}$ , равного моменту статического сопротивления на валу  $M_c$ .

Электромеханический процесс саморегулирования протекает следующим образом.

Пусть двигатель имеет частоту вращения  $n_1$  при уравновешенных моментах  $M_{sp1} = M_{cl}$ . Затем пусть произошло увеличение момента сопротивления:  $M_{c2} > M_{c1} = M_{sp1}$ . В соответствии с законом механики частота вращения двигателя станет меньше  $n_2 < n_1$ . Тогда противо-ЭДС  $E$  соответственно уменьшится ( $E = C_e n \Phi$ ), а это приведет к увеличению тока якоря двигателя:

$$I_a = \frac{U - E}{r_a}$$

А рост тока якоря увеличивает соответственно вращающий момент  $M_{sp} = C_m \Phi I_a$  до значения, равного увеличенному моменту сопротивления.

Таким образом, при частоте вращения  $n_2$ , меньшей, чем  $n_1$ , наступит новое равенство моментов

$$M_{sp2} = M_{c2}.$$

### 6.10.3. Механические характеристики двигателей

### постоянного тока

Одним из достоинств машин постоянного тока, как отмечено, является возможность регулирования частоты вращения двигателей в широких пределах.

Механическая характеристика представляет собой зависимость частоты вращения двигателя от развиваемого им момента

$$n = f(M)$$

при условии постоянства напряжения  $U$  и сопротивления обмотки возбуждения  $r_b$ .

Для вывода уравнения механической характеристики представим систему уравнений: ЭДС якоря (6.7), электрического состояния двигателя (6.2) и электромагнитного момента (6.12)

$$E = C_e n \Phi,$$

$$U = E + r_a I_a,$$

$$M = C_m \Phi I_a.$$

Из уравнения (6.7) имеем  $n = \frac{E}{C_e \Phi}$ . Подставив в это выражение значение  $E$  из уравнения (6.2), получим:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - I_a \frac{r_a}{C_e \Phi}. \quad (6.13)$$

Выразив ток якоря  $I_a$  из равенства (6.12), подставим в последнее выражение и получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{r_a}{C_e C_m \Phi^2}. \quad (6.14)$$

Первая часть этого уравнения выражает частоту вращения идеального холостого хода, т.е. частоту при работе двигателя без нагрузки ( $M_c = 0$ ):

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}. \quad (6.15)$$

#### 6.10.4. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

##### 6.10.4.1. ДВИГАТЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрим регулирование частоты вращения двигателя с параллельным возбуждением (рис. 6.23) при постоянстве напряжения сети и величины тока возбуждения  $U = \text{const}$  и  $I_e = \text{const}$ . Как следует из уравнения механической характеристики (6.14) и при постоянстве магнитного потока  $\Phi$ , с увеличением момента на валу  $M$  частота вращения  $n$  снижается незначительно, так как сопротивление обмотки якоря  $r_a$  очень мало.

Полученная механическая характеристика  $I$  называется естественной механической характеристикой, она изображается прямой, слегка наклоненной в сторону оси абсцисс.

При изменении нагрузки на валу двигателя от холостого хода ( $M = 0, n = n_0$ ) до номинальной ( $M = M_{\text{ном}}, n = n_{\text{ном}}$ ) частота вращения большинства двигателей параллельного возбуждения уменьшается лишь на 3 – 8%.

Таким образом, естественную механическую характеристику двигателей с параллельным возбуждением следует считать жесткой.

Более мягкую, т.е. с большим наклоном механическую характеристику можно получить, если включить последовательно с якорем реостат сопротивлением  $r$ . В этом случае уравнение механической характеристики имеет вид:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{r_a + r}{C_e C_M \Phi^2}. \quad (6.16)$$

Характеристики, полученные при изменении сопротивления реостата  $r$ , называются искусственными механическими характеристиками (прямые - 2, 3, 4; с увеличением  $r$  наклон характеристики увеличивается).

При неизменном моменте  $M_1$ , если постепенно увеличивать сопротивление реостата  $r$  в цепи якоря, то, как видно из рис. 6.23, частоту вращения можно изменить с величины  $n_1$  до  $n_4$ . Однако такой способ регулирования обуславливается значительными потерями мощности, он неэкономичен, применяется лишь для двигателей небольших мощностей.

Уравнение механической характеристики (6.16) показывает, что

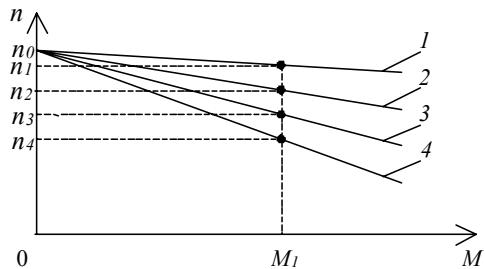


Рис. 6.23. Механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением

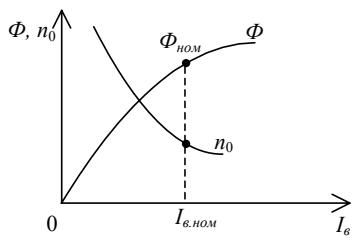


Рис. 6.24. Зависимости магнитного потока и частоты вращения при холостом ходе двигателя от тока

частота вращения двигателя при холостом ходе обратно пропорциональна магнитному потоку  $\Phi$ , а этот поток, пока магнитная цепь машины не насыщена, можно считать пропорциональным току возбуждения  $I_e$ . Следовательно, частоту вращения двигателя  $n$  при  $U = \text{const}$  можно регулировать изменением тока возбуждения посредством реостата, включенного в цепь возбуждения, этот способ называется полюсным регулированием.

Зависимости магнитного потока  $\Phi$  и частоты вращения  $n_0$  от тока возбуждения  $I_e$  при холостом ходе показана на рис. 6.24.

Полюсное регулирование используется при нагружочном режиме. Механические характеристики двигателя при различном возбуждении наклонены неодинаково к оси абсцисс (рис. 6.25).

Из уравнения механической характеристики следует, что при неизменном моменте  $M_1$ , чем меньше поток  $\Phi$ , тем больше частота вращения двигателя  $n$ .

Т.е. с ослаблением магнитного потока механическая характеристика становится мягче.

Полюсное регулирование является экономичным. Ввиду того, что регулируемый ток возбуждения мал, примерно  $2 - 3\% I_s$ , и дополнительные мощности потерь  $r_e I_e^2$  незначительны.

При этом способе регулирования следует учесть, что при значительном уменьшении магнитного потока (на 40 – 50% от номинального значения) происходит увеличение тока якоря из-за снижения противо-ЭДС и ухудшается условие коммутации машины. Поэтому с помощью полюсного метода регулирования частоту вращения можно

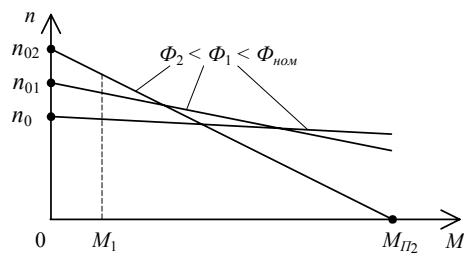


Рис. 6.25. Механические характеристики двигателя при различных значениях магнитного потока возбуждения  $\Phi$  ( $M_{n_2}$  – пусковой момент при потоке  $\Phi_2$ )

увеличивать не более, чем в 2 раза.

#### 6.10.4.2. ДВИГАТЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Схема двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 6.26.

Характерной особенностью двигателя последовательного возбуждения так же, как у генератора такого типа, является то, что ток якоря является вместе с тем током возбуждения, так как обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно

$$I_a = I_b = I.$$

Также последовательно с якорем включен пусковой реостат  $r_n$ , который после пуска выводится. При токах нагрузки, меньших  $(0,8-0,9)I_{nom}$ , считается, что магнитопровод двигателя не насыщен и магнитный поток  $\Phi$  пропорционален току возбуждения  $I_b = I$ , т.е.

$$\Phi = \kappa I. \quad (6.17)$$

Тогда вращающий момент пропорционален квадрату тока:

$$M = C_M \Phi I = C_M \kappa I^2 \quad (6.18)$$

и зависимость момента от тока имеет вид параболы (рис. 6.27).

График показывает одно из преимуществ двигателя последовательного возбуждения: значительное изменение вращающего момента можно осуществить при умеренных изменениях тока, благодаря которому, эти двигатели легко переносят перегрузки и развивают большой пусковой момент.

Из общего уравнения механической характеристики (6.14) можно получить уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения, если подставить значение магнитного потока

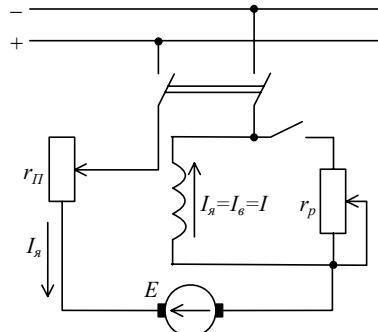


Рис. 6.26. Схема двигателя последовательного возбуждения

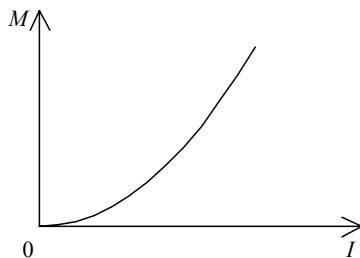


Рис. 6.27. Зависимость врачающего момента от тока для двигателя последовательного возбуждения

$$\Phi = \sqrt{\frac{\kappa M}{C_m}},$$

полученного из выражений (6.17 и 6.18), тогда имеем:

$$n = \sqrt{\frac{C_m}{C_e^2 \kappa}} \frac{U}{\sqrt{M}} - \frac{r_y}{C_e \kappa}.$$

Согласно полученному уравнению, механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения имеет вид гиперболы (рис. 6.28).

Из характеристики видно, что в области малых нагрузок частота вращения сильно зависит от нагрузки. При уменьшении нагрузки на валу двигателя резко повышается частота вращения и может достичь значения, опасного для целостности двигателя: двигатель «разносится». Пуск двигателя без нагрузки не допускается, он должен иметь нагрузку порядка не меньше 25% от номинальной.

При больших нагрузках, начиная с области номинальной, магнитная система двигателя насыщена, т.е. магнитный поток  $\Phi$  мало зависит от тока, поэтому механическая характеристика в этой части почти прямолинейна. В этой области частота вращения двигателя малая, тяговое усилие достаточно большое. Притом, малым снижениям частоты вращения соответствуют большие увеличения врачающего момента.

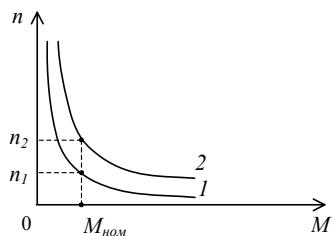


Рис. 6.28. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

Регулирование частоты вращения двигателя можно осуществить посредством реостата  $r_p$ , шунтирующего обмотку возбуждения. При шунтировании обмотки возбуждения уменьшается магнитный поток  $\Phi$ , тогда, согласно общего уравнения механической характеристики (6.14), возрастает частота вращения двигателя  $n$ , т.е., как уже было отмечено, частота вращения обратно пропорциональна потоку. Одновременно с уменьшением потока увеличивается величина тока, потребляемого двигателем, т.к. вращающий момент  $M = C_e \Phi I_a$  считаем неизменным.

Характеристика, полученная при шунтировании обмотки возбуждения сопротивлением реостата  $r_p$  (кривая 2), может быть названа искусственной механической характеристикой в отличие от естественной (кривая 1), полученной без шунтирования обмотки. Таким образом, за счет плавного регулирования сопротивлений шунтирующего реостата можно плавно изменять частоту вращения двигателя при постоянном моменте вращения, например, при  $M_{nom}$ , как указано на рисунке.

Отмеченные ценные качества двигателей постоянного тока последовательного возбуждения как перегрузочная способность, большой пусковой момент при мягкой механической характеристике позволяют успешно применять их как тяговые двигатели на электротранспорте, в подъемных кранах, в установках прокатного стана и т.д.

Двигатель параллельного возбуждения имеет жесткую механическую характеристику, а двигатель последовательного возбуждения - мягкую характеристику. В ряде случаев желательна некоторая промежуточная форма характеристики. В этом случае применяют двигатели смешанного возбуждения.

#### 6.10.5. Реверсирование и торможение двигателей постоянного тока

Реверсирование - изменение направления вращения вала (якоря) двигателя осуществляется изменением направления тока в якоре при неизменной полярности полюсов или изменением направления тока возбуждения при прежнем направлении тока в якоре.

Торможение электродвигателей проводится как с помощью механических тормозов, так и электрическими способами.

Различают три вида электрического торможения: динамическое, рекуперативное и противовключением.

При динамическом торможении вращающийся якорь двигателя отключают от сети и замыкают на сопротивление. Цепь возбуждения остается включенной в сеть. Якорь вращается по инерции, и машина в этом

случае переходит в режим генератора, где электромагнитный момент является тормозящим.

Динамическое торможение отмечается простотой, плавностью и надежностью.

Рекуперативное торможение (с возвратом энергии в сеть) происходит тогда, когда ЭДС якоря (противо-ЭДС) превысит напряжение сети. При этом машина из двигательного режима также переходит в генераторный, ток якоря и момент изменяют направления на обратные. Так как машина не отключена от сети, то энергия отдается в сеть.

Величину ЭДС повышают, согласно известной формуле  $E = C_e n \Phi$ , увеличением частоты вращения якоря или тока возбуждения. Притом, частота вращения якоря должна превышать частоту вращения идеального холостого хода, например, это условие выполняется при движении электропоезда под уклон. Рекуперативное торможение не приводит к остановке двигателя, а лишь ограничивает скорость.

Торможение противовключением осуществляется переключением вращающегося якоря на обратное направление посредством изменения направления тока якоря. Тогда момент изменяет знак, он становится тормозящим. После переключения ЭДС сохранит прежнее направление, совпадающее с новым направлением тока от сети, а это будет способствовать резкому росту величины тока. Для ограничения этого тока последовательно с якорем включают специальное сопротивление противовключения.

#### 6.10.6. Потери и КПД машин постоянного тока

При работе электрических машин в них имеют место потери - электрические, механические и магнитные.

Электрические потери  $\Delta P_e$  обусловлены потерями энергии на нагревание обмотки якоря и обмоток возбуждения проходящими по ним токами. Эти потери определяются произведениями сопротивлений обмоток на квадрат тока.

Магнитные потери  $\Delta P_m$  состоят из потерь на гистерезис и вихревые токи в стальном сердечнике якоря и появляются в результате его перемагничивания при вращении в магнитном поле машины.  $\Delta P_m$  составляет 1 – 3% от  $P_{nom}$ .

Механические потери  $\Delta P_{mex}$  обусловлены трениями в подшипниках и вентиляционными потерями.  $\Delta P_{mex}$  составляют менее 1 – 2%  $P_{nom}$ .

Основной энергетический показатель машины - коэффициент полезного действия  $\eta$  равен отношению полезной мощности  $P_2$ , отдаваемой машиной, к потребляемой мощности  $P_1$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%.$$

Полезная мощность, как известно, меньше потребляемой на величину общих потерь в машине  $\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_m + \Delta P_{mex}$ .

Определив полезную мощность  $P_2 = UI_h$  для генератора и подводимую мощность  $P_1 = UI_h$  для двигателя, можно выразить соответственно их КПД:

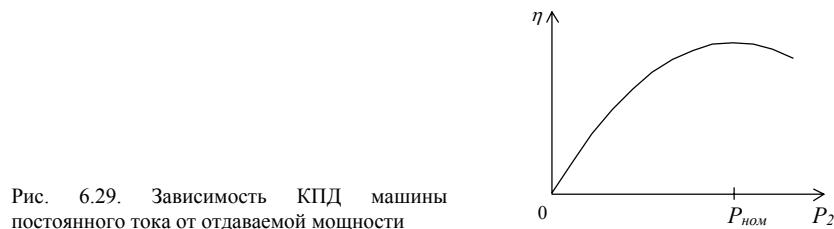
$$\eta_{gen} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \cdot 100\% \text{ и } \eta_{elec} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \cdot 100\%.$$

Принято определять зависимость КПД от отдаваемой мощности, т.е. зависимость  $\eta$  ( $P_2$ ) является рабочей характеристикой машины. Также к рабочим характеристикам относят зависимости тока  $I$ , момента  $M$ , частоты вращения  $n$  и других параметров от отдаваемой мощности  $P_2$ .

При холостом ходе, когда машина не отдает энергии ( $P_2 = 0$ ), а только потребляет ее, КПД равен нулю. С увеличением отдаваемой мощности  $P_2$  нагрузочный ток растет и соответственно увеличиваются потери.

На рис. 6.29 дана графическая зависимость КПД машины от ее полезной мощности.

Машину рассчитывают так, что наибольший КПД примерно соответствует номинальной мощности. При перегрузке увеличивается ток якоря, растут электрические потери, связанные с нагревом машины. КПД зависит от мощности машины. Для машин малой и средней мощностей  $\eta = 0,75 - 0,85$ , а в машинах большой мощности и особенно быстроходных  $\eta = 0,92 - 0,95$ .



## Глава седьмая

# АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### 7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Асинхронные машины относятся к машинам переменного тока. Широкое применение асинхронные машины нашли в качестве электрических двигателей. Благодаря простоте конструкции и надежности в работе, асинхронные двигатели являются самыми распространенными двигателями из всех электрических двигателей, применяющихся на практике. В электроприводе металлорежущих станков, подъемно-транспортных машин и для прочих производственных целей широко используются трехфазные асинхронные двигатели. Двигатели малой мощности в виде однофазных асинхронных двигателей применяются для привода электроинструмента, бытовой техники и т.п.

Трехфазный асинхронный двигатель был изобретен в 1888 г. русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским. В основу этого изобретения положен эффект «магнетизма вращения», открытый французским физиком Д.Ф. Араго в 1824 г., который заключался во вращении тонкого медного диска, укрепленного на неподвижной оси и установленного вблизи полюсов вращающегося *U*-образного магнита.

### 7.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Сначала рассмотрим принцип действия асинхронного двигателя на его модели. Пусть имеется вращающийся с частотой  $n_1$  *U*-образный магнит и вблизи его полюсов расположена рамка, укрепленная на полуоси из медного или алюминиевого провода (рис. 7.1).

При вращении магнита, горизонтальные части рамки, обозначенные на рис. 7.1(б) кружочками, пересекаются силовыми линиями магнитного поля. Согласно явлению электромагнитной индукции, в рамке возбуждаются ЭДС и ток, направления которых определены, согласно правила правой руки, с учетом относительных движений проводников.

Направления сил  $F$ , действующих на проводники с током в магнитном поле, как известно, определяются по правилу левой руки. Момент этих электромагнитных сил создает вращение рамки в том же направлении, что и вращение магнитного поля.

Таким образом, момент, движущий рамку, создается как результат взаимодействия вращающего магнитного поля с индуцируемыми токами в проводниках рамки. Притом, токи в обмотке рамки возникают в результате того, что рамка при вращении отстает от вращающегося поля, ибо в этом случае проводники пересекаются магнитными силовыми линиями.

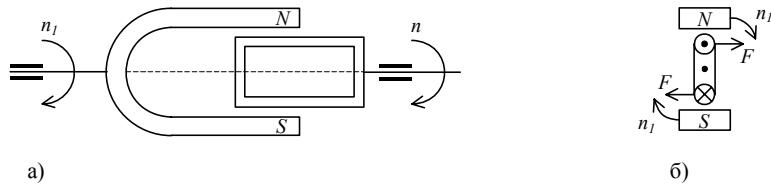


Рис. 7.1. Модель асинхронного двигателя

Если  $n$  - частота вращения рамки, то условие  $n < n_I$  или в общем случае  $n \neq n_I$ , т.е. условие неравенства частот вращений называется асинхронностью («а» - отрицание синхронности).

Рассмотренная модель служит лишь для пояснения принципа действия асинхронного двигателя. Несостоятельность такой модели для реального двигателя заключается в том, что вращение магнитного поля может быть получено, как рассматривали, за счет механической энергии. Электрический двигатель, как известно, потребляет электрическую, а отдает механическую энергию.

Для асинхронного двигателя необходимо, чтобы вращающееся магнитное поле было получено за счет затраты электрической энергии.

Большой заслугой Доливо-Добровольского в создании асинхронного двигателя является то, что предварительно им было получено вращающееся магнитное поле при использовании системы трехфазного тока.

Это поле создается неподвижной частью двигателя - статором. Поэтому прежде рассмотрим конструкцию асинхронного двигателя.

### 7.3. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный двигатель состоит из статора - неподвижной части и ротора - вращающейся части.

Сердечник статора представляет собой полый цилиндр, набранный из пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга слоем лака (рис. 7.2,а).

Сердечник статора является неподвижной частью магнитопровода, он закрепляется в стальном или алюминиевом корпусе двигателя.

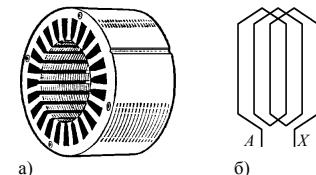


Рис. 7.2. Сердечник (а) и секция фазной обмотки (б) статора

На внутренней стороне сердечника имеются пазы для укладки статорных обмоток (катушек), смещенных по окружности цилиндра друг относительно друга на  $120^\circ$ . Начала и концы фазных обмоток выводятся на зажимы щитка двигателя. Начала фазных обмоток обозначаются соответственно –  $C_1, C_2, C_3$ , а их концы –  $C_4, C_5, C_6$ . На электрических схемах начала обозначаются –  $A, B, C$ , а соответствующие концы фазных обмоток –  $X, Y, Z$ .

С целью увеличения намагничивающей силы обмотка фазы статора выполняется не из одного витка, а из нескольких, образующих секцию. Секция статорной обмотки фазы  $A$  показана на рис. 7.2(б). Обычно фазная обмотка представляет многовитковую катушку для равномерного распределения по нескольким пазам, нужно ее разделить на соответствующее число соединенных последовательно секций.

На рис. 7.3 показаны схемы расположения выводов обмотки статора и способы соединения их между собой при соединении фаз звездой и треугольником.

Асинхронные двигатели различаются устройством ротора. Сердечник ротора имеет цилиндрическую форму и набирается из отдельных листов, изолированных друг от друга электротехнической стали, в котором имеются пазы для обмотки ротора. Он с обмоткой насаживается на вал, закрепленный в подшипниках, и устанавливается внутри статора.

Обмотка ротора бывает двух типов: короткозамкнутая и фазная, соответственно роторы называются короткозамкнутыми и фазными.

В большинстве двигателей применяется короткозамкнутый ротор. Он значительно дешевле и проще в изготовлении и в эксплуатации. Обмотка такого ротора имеет форму “беличьей клетки”, состоит из медных или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко с торцов кольцами. С целью улучшения охлаждения двигателя на кольцах имеются вентиляционные лопатки. Как правило, “беличья клетка” формируется путем заливки пазов сердечника ротора расплавленным алюминием. Отливаются заодно короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками на них. На рис. 7.4 представлен короткозамкнутый ротор (а - листовой элемент сердечника, б - короткозамкнутая обмотка – “беличья клетка”, в - ротор в сборе).

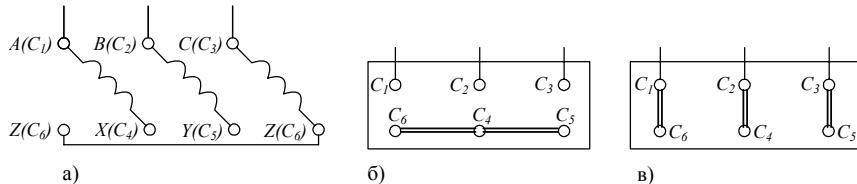


Рис. 7.3. Схемы расположения выводов фазных обмоток статора (а), соединения звездой (б), соединения треугольником (в)

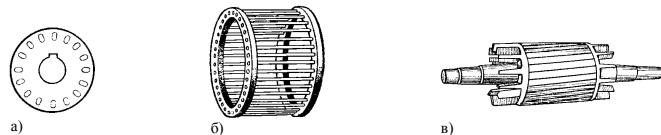


Рис. 7.4. Короткозамкнутый ротор

Обмотка в форме “беличьей клетки” не имеет скользящих контактов, поэтому трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором надежны в эксплуатации.

Фазный ротор имеет три обмотки, подобно статорной, соединенной звездой или треугольником. Три вывода обмотки соединяются с тремя изолированными друг от друга контактными кольцами, вращающимися вместе с валом машины.

Через щетки, касающиеся контактных колец, обмотка ротора включается к трехфазному пусковому или регулировочному реостату (рис. 7.5).

На рис. 7.6 приведены условные обозначения асинхронных двигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) роторами на принципиальных электрических схемах.

#### 7.4. ВОЗБУЖДЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Получение вращающего магнитного поля в асинхронном двигателе осуществляется при прохождении трехфазного тока по его статорным обмоткам. Рассмотрим этот процесс более подробно.

Три фазные обмотки  $AX$ ,  $BY$ ,  $CZ$  размещаются в пазах сердечника статора в виде витков или катушек, оси которых сдвинуты на  $120^\circ$  друг от друга (рис. 7.7).

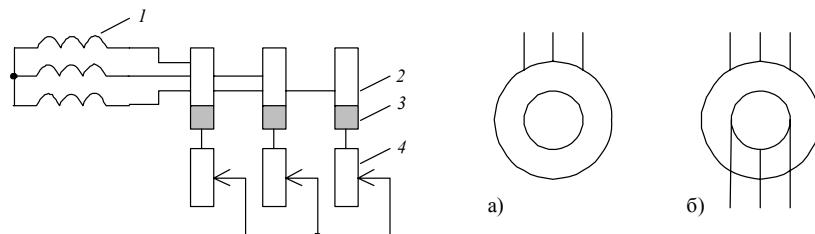


Рис. 7.5. Схема включения фазной обмотки ротора к реостату:

1 - фазная обмотка ротора; 2 - контактные кольца; 3 - щетки; 4 - пусковой, регулировочный реостат.

Рис. 7.6. Условные обозначения асинхронных двигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) роторами

Пусть от сети к обмоткам статора, соединенным звездой, подводится симметричная трехфазная система напряжений, под действием которой по обмоткам  $AX$ ,  $BY$  и  $CZ$  протекает трехфазная система токов:

$$i_1 = I_m \sin \omega t,$$

$$i_2 = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}),$$

$$i_3 = I_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}).$$

На рис. 7.7(б) и (в), соответственно, показаны положительные направления токов по обмоткам статора и графики этих токов  $i(t)$ .

За положительное направление тока принято направление от начала обмотки ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) к концу ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Токи, как известно, сдвинуты по фазе на  $\frac{2\pi}{3}$  рад. или по времени на  $\frac{T}{3}$ .

Каждая отдельная обмотка статора с синусоидальным током возбуждает пульсирующее магнитное поле.

Магнитные поля токов статорных обмоток совместно создают результирующее магнитное поле машины, картина которого изменяется во времени в зависимости от изменений фазных токов как по величине, так и по направлению.

Покажем магнитное поле статора машины в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  (рис. 7.8). В эти моменты, как видно из графика  $i(t)$ , один из фазных токов имеет положительное направление при величине, равной максимальному значению, а два других - отрицательные направления при величинах, равных половине максимального значения.

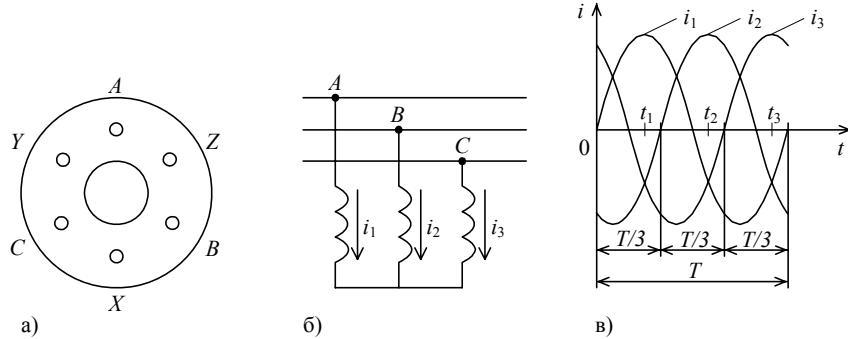


Рис. 7.7. Элемент сердечника статора с пазами для обмоток (а), положительные направления (б) и графики (в) токов в обмотках статора

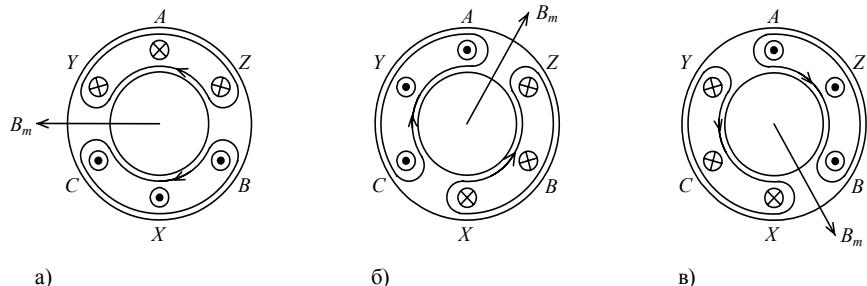


Рис. 7.8. Вид магнитного поля статора асинхронного двигателя в моменты времени:  $t_1$  (а),  $t_2$  (б),  $t_3$  (в)

Для изображения картины магнитного поля машины предварительно обозначают направления токов по обмоткам статора. Затем, пользуясь правилом правоходового винта, легко показать картину распределения магнитного поля.

Для момента времени  $t = t_1$  ток  $i_1$  имеет положительное направление, а токи  $i_2$  и  $i_3$  - отрицательные (рис. 7.7,в). Эти направления токов на рис. 7.8 обозначены знаками в начале и конце обмоток: « $\otimes$  - от нас», « $\ominus$  - к нам».

Теперь, пользуясь при заданных направлениях токов упомянутым выше правилом правоходового винта, легко показать направление силовых линий и картину распределения магнитного поля.

Соседние проводники, имеющие токи одного направления, обведены общей магнитной силовой линией.

Ось результирующего магнитного поля на рис. 7.8,а совпадает с осью катушки  $AX$ , вектор максимальной магнитной индукции  $B_m$  определяет направление поля в рассматриваемый момент  $t = t_1$ .

На рис. 7.8(б) показана картина магнитного поля в момент времени  $t = t_2$ , т.е. через промежуток времени  $\frac{T}{3}$  после момента  $t = t_1$ .

Сравнивая положение вектора магнитной индукции  $B_m$  для моментов времени  $t = t_1$  и  $t = t_2$ , следует отметить, что за время  $\frac{T}{3}$  магнитное поле повернулось по ходу часовой стрелки на  $1/3$  окружности статора или на  $120^\circ$ .

К такому же заключению можно прийти при сравнении картин магнитных полей на рис. 7.8(б) и (в) соответствующим моментам времени  $t = t_2$  и  $t = t_3$ .

После момента  $t = t_3$  через промежуток времени  $\frac{T}{3}$  вектор магнитной

индукции займет первоначальное положение, соответствующее моменту  $t = t_1$ .

Следовательно, магнитное поле асинхронного двигателя для рассмотренной конструкции обмоток статора за время, равное периоду тока  $T$ , поворачивается по ходу часовой стрелки на  $360^\circ$  или делает один полный оборот. Отсюда следует, что частота вращения магнитного поля  $n_1$  определяется частотой тока  $f$ , протекающего по обмотке статора.

Таким образом, следует заключить, что суммарный магнитный поток, созданный тремя пульсирующими потоками фаз, является вращающимся. Для получения вращающего магнитного поля необходимо, чтобы, во-первых, статорные обмотки имели пространственные сдвиги, и, во-вторых, токи по этим обмоткам имели временные сдвиги.

Следует заметить, если изменить порядок чередования токов в фазах (катушках) обмотки статора на обратный, например, принять, что ток  $i_1$  установится в цепи катушки  $CZ$ , а ток  $i_3$  - в цепи катушки  $BY$ , то результирующее поле будет вращаться в направлении против движения часовой стрелки, т.е. в противоположном направлении относительно рассмотренного прежде.

Направление вращения магнитного поля определяется порядком чередования токов в фазах обмотки статора, и поле поворачивается в сторону фазы с отстающим током.

#### 7.5. МНОГОПОЛЮСНАЯ ОБМОТКА СТАТОРА

##### и частота вращения магнитного поля

В рассмотренной конструкции статорной обмотки посредством трехфазной системы токов создается магнитное поле с одной парой полюсов

( $p = 1$ ), т.е. с двумя полюсами  $N, S$  (рис. 7.9).

Такое магнитное поле за период синусоидального тока  $T$ , как отметили, совершает один оборот, т.е. поворачивается на угол, соответствующий одной паре полюсов ( $360^\circ$ ).

Поле с одной парой полюсов возбуждается тремя фазными обмотками в виде трех катушек, то следует заметить, что одной паре полюсов соответствует одна катушка в фазной обмотке. Если фазную обмотку статора выполнить из двух, трех или более катушек, то соответственно

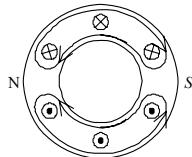


Рис. 7.9. Магнитное поле с одной парой полюсов ( $p=1$ )

можно увеличить число пар полюсов магнитного поля. Число пар полюсов  $p$  определяется числом катушек в обмотке фазы статора.

В многополюсной машине увеличение числа катушек на фазу требует при их размещении по окружности статора соответствующего уменьшения размеров катушек.

В рассмотренной двухполюсной обмотке (одна катушка на одну фазу) угловой размер между сторонами катушки составляет  $180^\circ$ , этот размер в многополюсной машине будет  $p$  раз сокращен, т.е. будет равен  $\frac{180^\circ}{p}$ .

На рис. 7.10(а) дана упрощенная схема четырехполюсной ( $p = 2$ ) обмотки статора. Здесь катушка показана в виде одного витка. Каждая фазная обмотка  $AX, BY, CZ$  выполнена из двух последовательных катушек соответственно  $AX'$  и  $A'X$ ,  $BY'$  и  $B'Y$ ,  $CZ'$  и  $C'Z$  (рис. 7.10,б). На одну катушку приходится угловой размер  $\frac{180^\circ}{2} = 90^\circ$ . Направления тока и магнитного поля указаны для момента времени  $t = t_1$ , как в предыдущем параграфе.

За время одного периода тока  $T$  магнитное поле четырехполюсной машины повернется на половину оборота, так как одна пара полюсов занимает половину окружности статора. В общем случае, когда двигатель имеет  $p$  пар полюсов, магнитное поле за период совершил  $\frac{1}{p}$  оборота. В

каждую секунду имеем  $f$  периодов, следовательно, поле совершил  $\frac{f}{p}$  оборотов в секунду. В технике принято определять частоту вращения числом оборотов в минуту. В результате выражение для частоты вращения магнитного поля статора двигателя имеет вид:

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \quad (7.1)$$

Таким образом, частота вращения магнитного поля асинхронного двигателя  $n_1$  зависит прямо пропорционально от частоты тока, проходящего по обмоткам статора  $f$ , и обратно пропорциональна от числа пар полюсов  $p$ . Для данного двигателя  $p$  - величина постоянная, а  $f$  - промышленная частота, поэтому  $n_1$  является постоянной, ее называют синхронной частотой вращения.

Двигатели выпускаются с различными значениями числа пар полюсов, в зависимости от него частота вращения магнитного поля различна (табл.7.1).

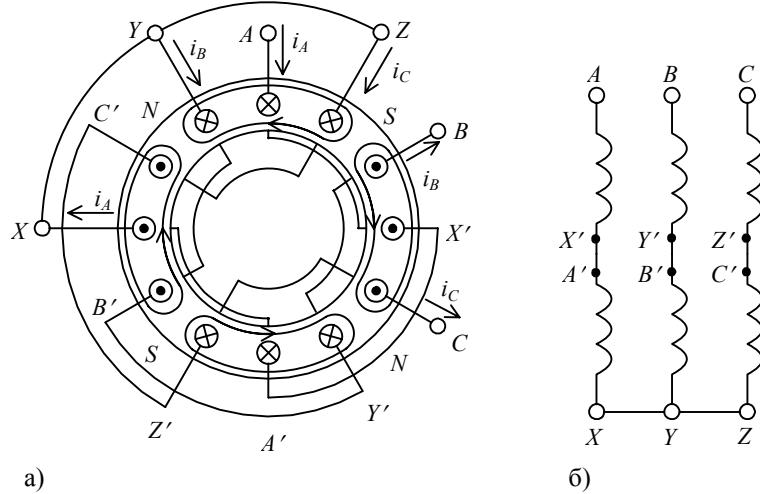


Рис. 7.10. Четырехполюсная обмотка статора:  
а) картина четырехполюсного магнитного поля;  
б) схема соединения.

**Таблица 7.1**

p	1	2	3	4	5
$n_1$ , об/мин.	3000	1500	1000	750	600

#### 7.6. СКОЛЬЖЕНИЕ. ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

В § 7.2. было установлено, что ротор (рамка) вращается частотой  $n$  меньшей, чем частота вращения магнитного поля  $n_1$ .

Степень отставания ротора от вращающего магнитного поля характеризуется величиной, которая называется скольжением асинхронного двигателя. Скольжение обозначают через  $S$  и выражают в относительных единицах или в процентах:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \text{ или } S = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\%. \quad (7.2)$$

Тогда частота вращения ротора равна:

$$n = n_1(1 - S).$$

С увеличением нагрузки на двигатель он испытывает увеличение тормозного момента, и частота вращения ротора  $n$  уменьшается. Частота вращения магнитного поля, зависящая только от частоты тока  $f$ , остается

неизменной, то скольжение увеличивается с увеличением нагрузки на двигатель.

В пределах номинальной нагрузки в зависимости от мощности двигателя скольжение имеет значения:

$$S=0,02-0,08 \text{ или } S=2-8\%.$$

Поскольку условием возникновения токов в роторе является неравенство частот вращений  $n \neq n_1$ , то:  $0 < n < n_1$  и  $I > S > 0$ .

В паспорте двигателя указывают номинальную частоту вращения ротора, меньшую от синхронной на 2 – 8%. По этим данным можно определить число пар полюсов и частоту вращения магнитного поля.

### 7.7. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ В ОБМОТКАХ СТАТОРА И РОТОРА

Обмотки асинхронного двигателя имеют электромагнитную связь, и в этом отношении асинхронная машина аналогична трансформатору: обмотка статора является первичной, а обмотка ротора вторичной.

В процессе работы трехфазного асинхронного двигателя намагничивающими силами этих обмоток создается результирующий магнитный поток  $\Phi$ , вращающийся относительно статора с частотой  $n_1$ . Этот рабочий поток, индукция которого имеет синусоидальное распределение в воздушном зазоре двигателя, наводит в обмотках машины синусоидальные ЭДС. Частота ЭДС обмотки статора  $f_1$  определяется частотой тока  $f$  этой обмотки и выражается из формулы (7.1):

$$f=f_1=\frac{pn_1}{60}.$$

На основе уравнения трансформаторной ЭДС можно выразить ЭДС обмотки статора:

$$E_1=4,44\kappa_{ob1} W_1 f_1 \Phi, \quad (7.3)$$

где  $\kappa_{ob1}$  – обмоточный коэффициент, учитывающий уменьшение ЭДС, обычно  $\kappa_{ob1} = 0,92 - 0,96$ ;

$W_1$  – число витков обмотки статора;

$\Phi$  – вращающийся рабочий магнитный поток (амплитудное значение потока  $\Phi_m$ , пронизывающего один виток, равно величине рабочего потока  $\Phi$ ).

Вращающийся магнитный поток пересекает проводники обмотки вращающегося ротора с малой частотой. При этом частота ЭДС ротора определяется выражением:

$$f_2=\frac{(n_1-n)p}{60}. \quad (7.4)$$

Если числитель и знаменатель умножить на  $n_1$ , то получим:

$$f_2 = Sf_1. \quad (7.5)$$

На основании полученной формулы можно убедиться, что частота ЭДС вращающегося ротора – величина относительно малая. Например, при частоте  $f_1 = 50$  Гц и изменении скольжения в пределах  $S = 0,02 – 0,08$ , частота ЭДС ротора будет всего  $f_2 = 1 – 4$  Гц.

По аналогии с (7.3) можно представить формулу ЭДС вращающегося ротора  $E_{2S}$  для одной фазы:

$$E_{2S} = 4,44\kappa_{o\delta 2}W_2f_2\Phi, \quad (7.6)$$

где  $\kappa_{o\delta 2}$  – обмоточный коэффициент ротора;  $W_2$  – число витков фазы ротора.

Из (7.6), учитывая (7.5), определяем ЭДС в заторможенном роторе, т.е. при  $n = 0$  и  $S = 1$ :

$$E_2 = 4,44\kappa_{o\delta 2}W_2f_1\Phi. \quad (7.7)$$

ЭДС вращающегося ротора (7.6) можно выразить через ЭДС заторможенного ротора (7.7) с учетом выражения (7.5), тогда:

$$E_{2S} = SE_2. \quad (7.8)$$

#### 7.8. ПОТОКИ РАССЕЯНИЯ.

#### ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА И РОТОРА

Токи, протекающие по обмоткам статора и ротора, создают незначительные потоки рассеяния  $\Phi_{P1}$  и  $\Phi_{P2}$ , которые замыкаются по воздуху. Эти потоки в соответствующих обмотках индуцируют ЭДС, которые называются ЭДС рассеяния статора и вращающегося ротора  $E_{P1}, E_{P2S}$ :

$$\begin{aligned} E_{P1} &= 4,44\kappa_{o\delta 1}W_1f_1\Phi_{P1}, \\ E_{P2S} &= 4,44\kappa_{o\delta 2}W_2f_2\Phi_{P2}, \end{aligned} \quad (7.9)$$

где  $\Phi_{P1}$  и  $\Phi_{P2}$  – соответственно амплитуды потоков рассеяния статора и ротора.

По аналогии с выражением (7.8) связь между ЭДС рассеяния вращающегося  $E_{P2S}$  и заторможенного  $E_{P2}$  ротора можно показать:

$$E_{P2S} = SE_{P2}. \quad (7.10)$$

Потоки рассеяния обуславливают наличие в обмотках индуктивных сопротивлений:

$$x_1 = 2\pi f_1L_1 \text{ - статора;}$$

$$x_2 = 2\pi f_1L_2 \text{ - неподвижного ротора;}$$

$$x_{2S} = 2\pi f_2L_2 = 2\pi f_1SL_2 \text{ - вращающегося ротора.}$$

Из последних выражений можно записать:

$$x_{2S} = Sx_2. \quad (7.11)$$

ЭДС рассеяния могут быть выражены через индуктивные падения напряжения в комплексной форме:

$$\dot{E}_{p1} = -jx_1 \dot{I}_1, \quad \dot{E}_{p2} = -jx_2 \dot{I}_2, \quad \dot{E}_{p2S} = -jx_{2S} \dot{I}_2. \quad (7.12)$$

### 7.9. ТОК В ОБМОТКЕ РОТОРА

Под действием ЭДС вращающегося ротора  $E_{2S}$  в обмотке ротора создается ток  $I_2$ , определяемый по закону Ома:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2S}}{r_2 + jx_{2S}}, \quad (7.13)$$

где  $r_2$  и  $jx_{2S}$  - соответственно активное и индуктивное сопротивления вращающегося ротора.

Учитывая формулы (7.8) и (7.11), ток ротора можно выразить через ЭДС  $E_2$  и индуктивное сопротивление  $x_2$  заторможенного ротора, не зависящие от скольжения:

$$\dot{I}_2 = \frac{S \dot{E}_2}{r_2 + jSx_2} = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{S} + jx_2}. \quad (7.14)$$

Действующее значение тока ротора:

$$I_2 = \frac{SE_2}{\sqrt{r_2^2 + (Sx_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{S}\right)^2 + x_2^2}}. \quad (7.15)$$

Равенства (7.14) и (7.15) выражают условную замену вращающегося ротора заторможенным при сохранении значения тока в роторе, равного значению тока во вращающемся роторе, и при значениях активного и индуктивного сопротивлений ротора соответственно равными  $r_2/S$  и  $x_2$ . Здесь величины  $E_2$  и  $x_2$  такие же, как и для заторможенного ротора, лишь  $r_2/S$  учитывает вращение ротора. Ввиду того, что обмотка ротора обладает сопротивлением активно-индуктивного характера, то ток ротора отстает от вызывавшей его ЭДС на некоторый угол, равный:

$$\psi_2 = \arctg \frac{Sx_2}{r_2} = \arccos \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (Sx_2)^2}}. \quad (7.16)$$

Из этого выражения видно, что угол сдвига фаз  $\psi_2$  увеличивается с увеличением скольжения. А причиной увеличения скольжения, как известно, является увеличение тормозного момента при увеличении нагрузки на вал двигателя.

На основе принципа действия асинхронного двигателя следует также заключить, что с увеличением скольжения возрастает и ток ротора  $I_2$ .

Таким образом, вместе с изменением нагрузки на валу асинхронного двигателя и скольжения происходит изменение частоты тока, величин ЭДС и тока в обмотке ротора.

#### 7.10. ТОК ФАЗЫ ОБМОТКИ СТАТОРА

При электромагнитной связи обмоток ротора и статора так же, как и в трансформаторе, изменения тока в цепи ротора вызывают изменения тока в цепи статора.

Зависимость между токами ротора и статора асинхронного двигателя определяется на основании уравнения намагничивающих сил обмоток. Сначала покажем, что величина рабочего магнитного потока практически сохраняется постоянной как при работе двигателя в режиме холостого хода, так и при режиме нагрузки.

Как у трансформатора, напряжение, приложенное к фазе обмотки статора  $U_1$ , уравновешивается ЭДС статора  $E_1$ , индуцируемой вращающимся магнитным полем и напряжениями на активном  $r_1$ , индуктивном  $x_1$  сопротивлениях этой обмотки:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1. \quad (7.17)$$

Машину проектируют так, что основная часть напряжения  $U_1$  уравновешивается ЭДС  $E_1$ . Поэтому при анализе и расчете процессов в машине можно принять:

$$U_1 \approx E_1 = 4,44\kappa_{ob}f_1W_1\Phi, \quad (7.18)$$

где  $4,44\kappa_{ob}f_1W_1$  - постоянная машины.

Известно, что напряжение сети  $U$ , приложенное к обмотке статора ( $U = U_1$ ), сохраняет практически свою величину неизменной независимо от режима работы двигателя. Тогда из формулы (7.18) следует, что рабочий магнитный поток  $\Phi$  остается по величине постоянным как в режиме холостого хода, так и в режиме нагрузки двигателя.

Магнитные потоки статора и ротора создаются их намагничивающими силами, определяемыми произведениями числа витков соответствующей обмотки  $W$  на ее ток  $I$ .

При холостом ходе асинхронного двигателя скольжение  $S$  близко к нулю, тогда ток ротора  $I_2$  практически равен нулю, следовательно,

намагничающая сила обмотки ротора равна нулю. В этом случае магнитный поток машины создается намагничающими силами только статорных обмоток и равен  $\Phi$ . В режиме нагрузки магнитный поток машины создается суммарными намагничающими силами обмоток статора и ротора, он остается по величине как при режиме холостого хода, равным  $\Phi$ .

Учитывая число фаз  $m_1$  статорной и  $m_2$  роторной обмоток, можно написать уравнение, отражающее постоянство намагничающей силы двигателя независимо от его режима работы:

$$m_1 \kappa_{o\delta 1} W_1 \dot{I}_1 + m_2 \kappa_{o\delta 2} W_2 \dot{I}_2 = m_1 \kappa_{o\delta 1} W_1 \dot{I}_0, \quad (7.19)$$

где  $I_0$  - ток холостого хода фазы статора.

Магнитные потоки статора и ротора не совпадают по фазе, хотя вращаются с одинаковой скоростью, поэтому их сложение производится комплексным методом.

Если члены уравнения (7.19) разделить на  $m_1 \kappa_{o\delta 1} W_1$ , то получим:

$$\dot{I}_1 + \frac{m_2 \kappa_{o\delta 2} W_2}{m_1 \kappa_{o\delta 1} W_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_0. \quad (7.20)$$

Коэффициент  $\kappa_i = \frac{m_1 \kappa_{o\delta 1} W_1}{m_2 \kappa_{o\delta 2} W_2}$  называется коэффициентом

трансформации по току. Величину  $\frac{m_2 \kappa_{o\delta 2} W_2}{m_1 \kappa_{o\delta 1} W_1} \dot{I}_2$  называют приведенным

током ротора и обозначают через  $\dot{I}'_2$ , который можно записать:

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{\kappa_i} \quad \text{или} \quad \dot{I}_2 = \kappa_i \dot{I}'_2. \quad (7.21)$$

Используя приведенное значение тока ротора  $\dot{I}'_2$ , имеем:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0, \quad (7.22)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2 \quad \text{или} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (7.23)$$

Таким образом, ток фазы обмотки статора складывается из тока холостого хода и приведенного тока обмотки ротора. Ток холостого хода является намагничающим током, он в асинхронном двигателе имеет в 5-10 раз большую величину, чем ток холостого хода трансформатора такой же мощности. Это объясняется наличием воздушного зазора в магнитной цепи машины, увеличивающего магнитное сопротивление и требующего

большего значения намагничивающей силы для создания необходимого рабочего магнитного потока.

Относительно большой ток холостого хода, который составляет 0,2–0,5 от номинального значения тока фазы статора  $I_{1\text{ном}}$ , в зависимости от мощности двигателя вызывает уменьшение коэффициента мощности двигателя особенно при их малой мощности и также в случае малой нагрузки на двигатель.

Таким образом, ток в статорной обмотке асинхронного двигателя  $I_1$ , работающего под нагрузкой, равен геометрической сумме тока холостого хода  $I_0$  и приведенного тока ротора  $I'_2$ . Увеличение нагрузки на двигатель вызывает увеличение приведенного значения тока  $I'_2$ , а это способствует возрастанию тока статора  $I_1$ .

#### 7.11. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При анализе работы асинхронного двигателя удобно пользоваться его схемой замещения. Схема замещения и векторная диаграмма двигателя могут быть заданы в том случае, если ЭДС и токи статора и ротора имеют одинаковую частоту. Частота же их будет одинаковой при неподвижном роторе. Если вращающуюся обмотку ротора теоретически заменить эквивалентным неподвижным, то следует соблюдать условия эквивалентности, которые заключаются в сохранении неизменности величины тока, мощности и фазовых сдвигов. Эти условия ранее рассмотрены, и, согласно формул (7.14) и (7.15), эквивалентная электрическая цепь заторможенного ротора будет иметь индуктивное сопротивление, равное  $x_2$ , и активное сопротивление  $\frac{r_2}{S}$ . При этом ЭДС, индуцируемая в роторе, равна:

$$\dot{E}_2 = \frac{r_2}{S} \dot{I}_2 + jx_2 \dot{I}_2, \quad (7.24)$$

а угол отставания тока ротора  $I_2$  от ЭДС равен  $\psi_2$ . На основе этих условий и, учитывая электромагнитную связь между цепями статора и ротора через основной поток  $\Phi$ , можно изобразить схему замещения асинхронного двигателя (рис. 7.11,а).

Для получения приведенной Т-образной схемы замещения (рис. 7.11,б) обмотку ротора приводят к обмотке статора. Для чего параметры ротора рассчитываются при посредстве коэффициентов трансформации по ЭДС и току.

Отношение ЭДС статора и заторможенного ротора

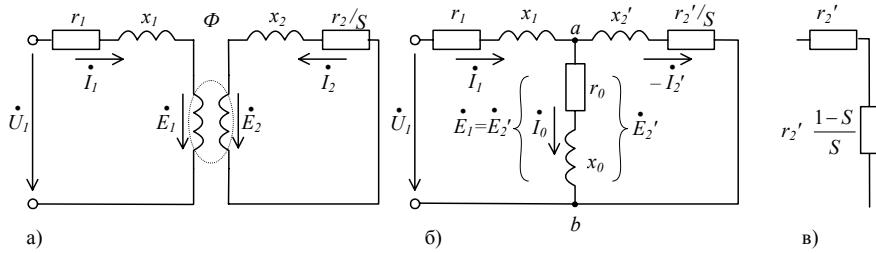


Рис. 7.11. Схемы замещения асинхронного двигателя

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\kappa_{o\delta_1} W_1}{\kappa_{o\delta_2} W_2} = \kappa \quad (7.25)$$

называется коэффициентом трансформации ЭДС асинхронного двигателя.

Аналогично, как для трансформатора, вводится понятие об ЭДС заторможенного ротора, приведенной к статору:

$$E'_2 = \kappa E_2 = E_1. \quad (7.26)$$

Умножив уравнение (7.24) на коэффициент трансформации ЭДС  $\kappa$ , получим:

$$\kappa \dot{E}_2 = \kappa \frac{r_2}{S} \dot{I}_2 + j \kappa x_2 \dot{I}_2.$$

В полученное уравнение, подставив выражения (7.21) и (7.26), имеем:

$$\begin{aligned} \dot{E}'_2 &= \frac{\kappa \kappa_i r_2}{S} \dot{I}'_2 + j \kappa \kappa_i x_2 \dot{I}'_2 \quad \text{или} \\ \dot{E}'_2 &= \frac{r'_2}{S} \dot{I}'_2 + j x'_2 \dot{I}'_2, \end{aligned} \quad (7.27)$$

где  $r'_2 = \kappa \kappa_i r_2$  и  $x'_2 = \kappa \kappa_i x_2$  - соответственно приведенные активное и индуктивное сопротивления ротора.

С учетом уравнения (7.27) в приведенной схеме замещения, в отличие от схемы (рис. 7.11, а), электромагнитная связь между цепями статора и ротора заменена электрической связью. Эта замена выполнена за счет введения намагничивающей ветви  $ab$  с сопротивлениями  $r_0$  и  $x_0$ , где активное сопротивление  $r_0$  соответствует потерям в стали машины, а  $x_0$  - индуктивное сопротивление фазы статора, обусловленное рассеянием основного магнитного потока.

По ветви  $ab$  проходит намагничивающий ток двигателя, равный, как было указано, току холостого хода, выражаемого по формуле (7.22). Напряжение между точками  $a$  и  $b$  намагничивающей ветви равно  $E'_2 = E_1$ , и напряжение статорной обмотки может быть задано приведенным уравнением (7.17).

Величину  $r'_2 / S$  (рис. 7.11,б) можно представить в виде:  $r'_2 + r'_2 \frac{1-S}{S}$  (рис. 7.11,в). Где  $r'_2 \frac{1-S}{S}$  – добавочное активное сопротивление, зависящее от скольжения. Электрическая мощность, затрачиваемая в этом сопротивлении, эквивалентна механической мощности, развиваемой двигателем.

## 7.12. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Векторную диаграмму асинхронного двигателя построим для ее основного, нагружочного режима работы. Диаграмма асинхронного двигателя подобна диаграмме трансформатора в силу сходства их устройства и теории.

Вращающийся магнитный поток является общим для статора и ротора, поэтому при построении диаграммы вектор магнитного потока  $\Phi$  берется как за исходный.

Векторная диаграмма строится, согласно Т-образной схеме замещения, поэтому все величины, относящиеся к ротору, берутся приведенными.

ЭДС статора и ротора, соответственно  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}'_2$ , индуцируемые потоком  $\dot{\Phi}$ , отстают по фазе от потока на угол  $\frac{\pi}{2}$ . Ввиду приведения ЭДС ротора к ЭДС статора, как было указано (7.26),  $E'_2 = E_1$ . Вектор тока холостого хода  $\dot{I}_0$  опережает вектор магнитного потока на угол магнитных потерь  $\delta$  в стальном сердечнике. Вектор приведенного тока ротора  $\dot{I}'_2$ , ввиду наличия

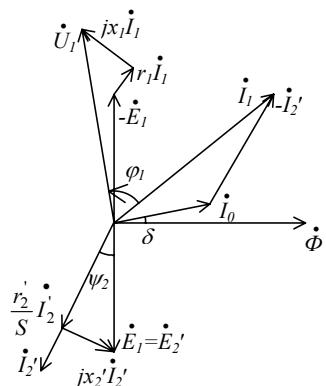


Рис. 7.12. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

в цепи ротора активного  $\frac{r'_2}{S}$  и индуктивного  $x'_2$  сопротивлений, отстает по фазе от ЭДС  $\dot{E}'_2$  на угол  $\psi_2 = \arctg \frac{Sx_2}{r_2}$ . Этот угол, как зависящий от скольжения  $S$ , увеличивается с возрастанием нагрузки на двигатель. При нагрузке, не превышающей номинального значения, скольжение, как отмечали, имеет малое значение  $S = 0,02 - 0,08$ , поэтому угол  $\psi_2$  невелик. Согласно уравнения (7.26) схемы замещения

$$\dot{E}'_2 = \frac{r'_2}{S} \dot{I}'_2 + jx'_2 \dot{I}'_2,$$

ЭДС приведенного ротора равна геометрической сумме активного напряжения  $\frac{r_2}{S} \dot{I}'_2$ , совпадающего по фазе с током  $\dot{I}'_2$  и индуктивного напряжения  $jx'_2 \dot{I}'_2$ , опережающего по фазе вектор тока  $\dot{I}'_2$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Вектор тока фазы статора строится на основе также рассмотренного уравнения токов (7.23)

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

Из диаграммы видно, что с ростом нагрузки, т.е. ростом тока ротора  $\dot{I}'_2$ , угол сдвига фаз  $\varphi_1$  будет уменьшаться.

Уравнение для цепи статора (7.17)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1$$

позволяет строить диаграмму векторов напряжений аналогично как для первичной обмотки трансформатора.

### 7.13. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с токами, индуцированными им в проводниках обмотки ротора, возникают электромагнитные силы, действующие на эти проводники, которые создают вращающий момент двигателя.

Эти силы по величине разные, т.к. зависят от значения магнитной индукции  $B$  в месте расположения проводника ротора и величины тока  $i_2$  в нем. Сила, действующая на проводник ротора:

$$F = Bi_2 l, \quad (7.28)$$

где  $l$  - активная длина проводника обмотки ротора.

Равномерность вращения магнитного поля создает распределение магнитной индукции по окружности ротора в виде гармонической функции угла:

$$B = B_m \sin \alpha, \quad (7.29)$$

Известно, что ток в проводнике ротора отстает по фазе от вызвавшей его ЭДС на угол  $\psi_2$ . Считая, что наибольшая ЭДС индуцируется в проводниках, расположенных в точках с наибольшим значением магнитной индукции, можно заключить о совпадении ЭДС и магнитной индукции по фазам.

Тогда ток ротора можно представить:

$$i_2 = I_{2m} \sin(\alpha - \psi_2). \quad (7.30)$$

Подстановка выражений (7.29) и (7.30) в формулу переменной силы (7.28) дает:

$$F = B_m I_{2m} \sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \psi_2) l. \quad (7.31)$$

Для определения полного электромагнитного момента следует предварительно найти среднее значение силы, а для этого необходимо вычислить среднее значение функции  $\sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \psi_2)$  в пределах окружности, т.е.

$$\frac{\int_0^{2\pi} \sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \psi_2) d\alpha}{2\pi} = \frac{\cos \psi_2}{2}. \quad (7.32)$$

Тогда среднее значение силы:

$$F_{cp} = B_m I_{2m} l \frac{\cos \psi_2}{2}. \quad (7.33)$$

Выразим теперь среднее значение магнитной индукции в пределах угла  $\pi$ :

$$B_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} B_m \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi} B_m. \quad (7.34)$$

Также среднее значение магнитной индукции можно найти через магнитный поток полюса  $\Phi$  и соответствующую ему площадь поверхности ротора:

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{\pi D l}, \quad (7.35)$$

где  $D$  - диаметр окружности ротора.

Приравнивая правые части последних выражений, найдем:

$$B_m = \frac{\Phi}{D l}. \quad (7.36)$$

Учитывая последнее полученное выражение (7.36) и связь между действующим и максимальным значениями тока  $I_m = \sqrt{2}I$ , запишем выражение (7.33) для среднего значения силы:

$$F_{cp} = \frac{\sqrt{2}\Phi}{Dl} I_2 l \frac{\cos\psi_2}{2} = \frac{\sqrt{2}\Phi}{D} I_2 \frac{\cos\psi_2}{2}. \quad (7.37)$$

Среднее значение момента, действующего на один проводник ротора:

$$M_{cp} = F_{cp} \frac{D}{2} = \frac{\sqrt{2}}{4} \Phi I_2 \cos\psi_2. \quad (7.38)$$

Если  $N_2$  - число проводников в обмотке ротора, то вращающий электромагнитный момент двигателя будет равен:

$$M = N_2 M_{cp} = \frac{\sqrt{2}N_2}{4} \Phi I_2 \cos\psi_2. \quad (7.39)$$

Из полученной формулы можно заключать, что величина вращающего момента зависит от активной составляющей тока ротора  $I_2 \cos\psi_2 = I_{2a}$ .

Обозначив постоянную величину для данной машины  $C = \frac{\sqrt{2}N_2}{4}$ , выражение электромагнитного момента асинхронного двигателя примет вид:

$$M = C\Phi I_2 \cos\psi_2. \quad (7.40)$$

Обычно незначительными по величине потерями в роторе можно пренебречь и считать электромагнитный момент равным моменту на валу двигателя.

#### 7.14. ЗАВИСИМОСТЬ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ДВИГАТЕЛЯ ОТ СКОЛЬЖЕНИЯ

Вращающий момент двигателя зависит от изменяющихся при нагрузке тока ротора  $I_2$  и от угла сдвига  $\psi_2$  между ЭДС и током ротора или от  $\cos\psi_2$ . Было сделано допущение, что магнитный поток  $\Phi$  сохраняет свою величину при всех режимах работы двигателя.

Однако ток  $I_2$ , как и угол  $\psi_2$ , зависят от скольжения  $S$ , что позволяет выразить вращающий момент в виде функции одной переменной.

Используя полученные выражения (7.3), (7.15), (7.16) и (7.25), имеем:

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{SE_2}{\sqrt{r_2^2 + (Sx_2)^2}}; \quad \Phi = \frac{E_1}{4,44\kappa_{o\delta 1}W_1f}; \\ \cos\psi_2 &= \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (Sx_2)^2}}; \quad E_2 = \frac{E_1}{\kappa}. \end{aligned} \quad (7.41)$$

Используя эти соотношения, из (7.40) получим следующее выражение для вращающего момента:

$$M = \frac{C}{4,44\kappa_{o61}\kappa W_1 f} \cdot \frac{Sr_2 E_1^2}{r_2^2 + (Sx_2)^2}.$$

Обозначив теперь постоянную машины

$$C_m = \frac{C}{4,44\kappa_{o61}\kappa W_1 f},$$

получим

$$M = C_m \frac{Sr_2 E_1^2}{r_2^2 + (Sx_2)^2}. \quad (7.42)$$

Учитывая приблизительное равенство, как было отмечено, между ЭДС статора  $E_1$  и напряжением сети  $U_1$  формулу вращающего момента можно представить в виде:

$$M \approx C_m U_1^2 \frac{Sr_2}{r_2^2 + (Sx_2)^2}. \quad (7.43)$$

В этой формуле единственной переменной является скольжение  $S$ , т.е. вращающий момент будет функцией скольжения. График этой функции показан на рис. 7.13. и видно, что при малых значениях скольжения, когда значение  $Sx_2$  мало, вращающий момент двигателя растет примерно пропорционально скольжению. При значительном увеличении скольжения момент начинает убывать. Это объясняется с помощью формулы (7.43) тем, что при больших значениях скольжения знаменатель растет быстрее числителя. Вращающий момент достигает своего наибольшего значения  $M_{max}$  при скольжении, которое называется критическим  $S_{kp}$ . А при наибольшем значении скольжения  $S=1$  ( $n=0$ ) момент принимает значение  $M_{nysk}$ , которое называется пусковым.

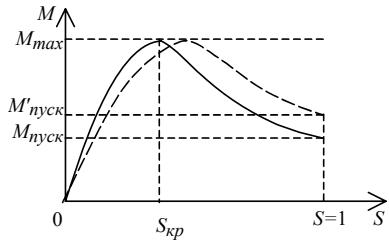


Рис. 7.13. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

Характер изменения вращающегося момента можно объяснить и на основе формул (7.40, 7.41) тем, что при малых значениях скольжения рост

тока  $I_2$  преобладает над уменьшением  $\cos\psi_2$ , а при больших значениях скольжения уменьшение  $\cos\psi_2$  преобладает над ростом тока  $I_2$ .

Найдем выражение для максимального вращающего момента. Для этого из (7.43) определим производную от момента по скольжению:

$$\frac{dM}{dS} = C_M U_1^2 r_2 \frac{r_2^2 - (Sx_2)^2}{[r_2^2 + (Sx_2)^2]^2} \quad (7.44)$$

и, приравняв ее к нулю, определим критическое скольжение:

$$S_{kp} = \frac{r_2}{x_2}. \quad (7.45)$$

Подставляя значение критического скольжения в выражение (7.43), получим максимальный момент двигателя:

$$M_{max} = C_M U_1^2 \frac{1}{2x_2}. \quad (7.46)$$

Максимальный момент пропорционален квадрату напряжения, поэтому асинхронные двигатели очень чувствительны к колебанию напряжения в сети. Из формулы следует, что величина максимального момента не зависит от активного сопротивления ротора  $r_2$ , но значение критического скольжения, как видно из (7.45), пропорционально  $r_2$ . С увеличением активного сопротивления ротора  $r_2$  максимум момента смещается в сторону большего скольжения, это показано на рис. 7.13 пунктирной линией. Практически активное сопротивление ротора можно увеличить у двигателя с фазным ротором, если в цепь ротора включить добавочное сопротивление в виде пускового реостата, что дает увеличение пускового момента от  $M_{пуск}$  до  $M'_{пуск}$ .

#### 7.15. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Наибольшую практическую значимость имеет механическая характеристика двигателя, где рассматривается связь двух механических величин - это зависимость частоты вращения от момента. Механическая характеристика  $n = f(M)$  может быть получена из зависимости  $M = f(S)$ , если учитывать известную связь между частотой вращения ротора  $n$  и скольжением  $n = n_1(1 - S)$ .

Механическая характеристика показана на рис. 7.14.

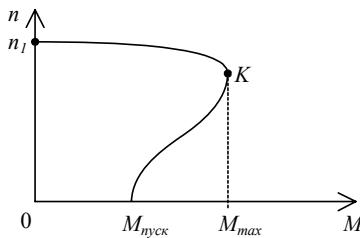


Рис. 7.14. Механическая характеристика асинхронного двигателя

В этой характеристике можно отметить две характерные точки, определяемые: значением момента  $M = 0$  при идеальном холостом ходе  $n = n_1$ , где  $S = 0$ , и пусковым моментом  $M_{пуск}$  при  $n = 0$ , где  $S = 1$ .

Механическая характеристика является основной характеристикой любого электрического двигателя, определяющей его эксплуатационные возможности.

Точка максимального момента  $K$  делит механическую характеристику на две части: верхняя - «устойчивая» и нижняя - «неустойчивая». В устойчивой части характеристики проявляется принцип саморегулирования двигателя, т.е. при увеличении нагрузки (момента сопротивления внешних сил) растет и врачающий момент, а затем устанавливается равновесие моментов при уменьшенном значении частоты вращения двигателя.

В неустойчивой части характеристики увеличение нагрузки вызывает снижение частоты вращения, момент двигателя не растет, а падает, в результате чего двигатель останавливается.

Саморегулирование и устойчивая работа двигателя обеспечиваются от момента  $M = 0$  до момента, близкого к  $M = M_{max}$ . В этой части механическая характеристика жесткая, т.е. наклон кривой незначительный, что соответствует малому изменению частоты вращения  $n$  при изменении нагрузки.

Режим длительной работы, при котором двигатель не перегревается выше допустимой нормы, называется его номинальным режимом. Момент  $M_{ном}$ , соответствующий номинальному режиму, называется номинальным моментом. Соответствующие ему номинальное скольжение  $S_{ном}$  и номинальная частота вращения  $n_{ном}$  двигателей средней мощности составляют соответственно:  $S_{ном} = 0,02 - 0,06$  и  $n_{ном} = (0,94 - 0,98) n_1$ .

Отношение максимального момента к номинальному  $\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$  называется перегрузочной способностью, обычно  $\lambda = 1,8 - 2,5$ .

Отношение пускового момента к номинальному  $K = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$  называется кратностью пускового момента. Для двигателей с короткозамкнутым ротором  $K = 1,1 - 1,8$ .

#### 7.16. ПУСК В ХОД АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пусковые свойства двигателя определяются в первую очередь значением пускового тока  $I_{\text{пуск}}$  (ток фазы статора в момент пуска) или его кратностью, т.е. отношением пускового тока к его номинальному значению  $\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$  и значением пускового момента или его кратностью  $\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$ . Двигатель, обладающий хорошими пусковыми свойствами, развивает значительный пусковой момент при сравнительно небольшом пусковом токе.

В большинстве случаев применяется пуск двигателей с короткозамкнутым ротором, посредством их прямого включения в сеть. Хотя такой способ пуска весьма прост, но обладает следующими существенными недостатками:

- 1) возникает большой пусковой ток  $I_{\text{пуск}}$ , который превосходит номинальный ток  $I_{\text{ном}}$  в 5-7 раз;
- 2) увеличение тока при пуске двигателя снижает напряжение сети, что неблагоприятно сказывается на потребителях, подключенных к этой сети;
- 3) в момент пуска двигатель развивает относительно малый момент  $M_{\text{пуск}}$ , который превосходит номинальный момент  $M_{\text{ном}}$  только в 1,2-1,6 раза.

Кратковременный пусковой ток относительно безопасен для двигателя. В случае если двигатель разгоняется длительное время или осуществляется его частые пуски, то от большого пускового тока обмотки двигателя могут нагреваться до температуры больше допустимой.

Увеличение тока в цепи статора в момент пуска связано с повышением тока в цепи ротора в этот же момент. Было отмечено (7.23), что ток статора складывается из тока холостого хода  $I_0$  и приведенного тока обмотки ротора  $I'_2$ , т.е.

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

А величина тока ротора определяется значением ЭДС ротора, которая в свою очередь зависит от скольжения. В начальный момент пуска скольжение  $S=1$ , так как ротор еще неподвижен ( $n=0$ ), а частота вращения магнитного поля сразу же достигает номинального значения равного  $n_1$ . Поэтому скорость пересечения проводников ротора линиями

магнитной индукции вращающегося поля наибольшая, тогда величина ЭДС и тока ротора достигают наибольших значений.

Пусковые условия асинхронного двигателя можно существенно улучшить, если снизить значение пускового тока. Для этого применяется несколько способов в зависимости от конструкции двигателя.

#### 7.16.1. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

Схема пуска двигателя с фазным ротором дана на рис. 7.15, где каждая фаза трехфазного пускового реостата включена через щетки и кольца в одну из фазных обмоток ротора. Полное сопротивление фазы реостата выбирается из условий ограничения пускового тока допустимым значением, равным примерно  $(1,6-2,2) I_{\text{ном}}$ . В начале пуска реостат вводится полностью и этим самым пусковой ток статора ограничиваются до нужного значения.

К концу пуска реостат выводится. Эта схема запуска двигателя позволяет не только уменьшить величину пускового тока, но и увеличить пусковой момент так, чтобы его среднее значение в процессе пуска было близко к его максимальной величине.

Если двигатель включается при значительном нагрузочном моменте на валу, то требуется, чтобы он развивал достаточно большой пусковой момент. Известно, что максимальный момент определяется критическим скольжением  $S_{kp} = \frac{r_2}{x_2}$ .

В момент пуска скольжение  $S = 1$ , и чтобы двигатель развивал в это время максимальный врачающий момент, критическое скольжение должно иметь значение, равное единице, т.е. активное и индуктивное сопротивления цепи ротора должны быть равны по величине

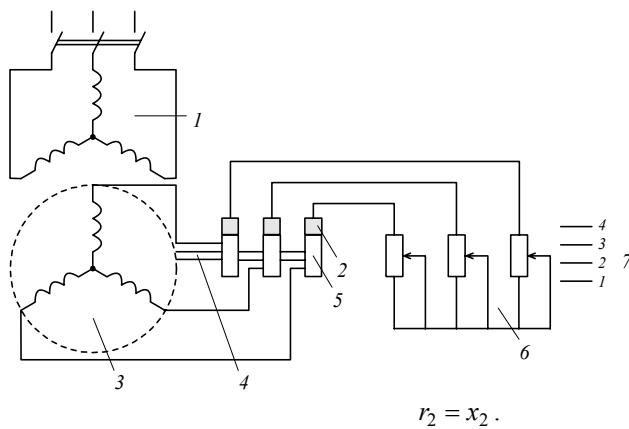


Рис. 7.15. Схема пуска двигателя с фазным ротором:  
 1 - статор, 2 - щетки,  
 3 - ротор, 4 - вал,  
 5 - контактные кольца,  
 6 - пусковой трехфазный реостат ПР, 7 - положения рычага ПР для ступенчатого изменения сопротивления (7.47)

Но при пуске двигателя индуктивное сопротивление ротора  $x_2$  значительно превосходит его активное сопротивление  $r_2$  вследствие большой частоты тока в роторе. Тогда условие (7.47), обеспечивающее максимальный момент у двигателя, достигается включением добавочного сопротивления в цепь ротора с помощью пускового реостата.

Известно, что увеличение активного сопротивления цепи ротора в определенной мере изменяет характер зависимости вращающего момента  $M$  от скольжения  $S$ , и максимум кривой  $M = f(S)$  смещается в сторону большего скольжения.

На рис. 7.16 представлены зависимости  $M = f(S)$  при дополнительных сопротивлениях цепи ротора четырех ступеней пускового реостата (кривые I, II, III и IV соответствуют по порядку положениям 1, 2, 3, 4 на ПР).

В начале пуска двигателя сопротивление пускового реостата полностью вводится в цепь ротора (положение рычага 1). Сопротивление фазы реостата должно быть рассчитано на получение максимального пускового момента. После включения двигателя последовательно выводятся сопротивления ступеней пускового реостата из цепи ротора так, чтобы ток ротора оставался приблизительно неизменным, а среднее значение пускового момента было близко к наибольшему.

Начальный момент пуска определяется точкой  $A$  ( $S=1, M=M_{n \max}$ ) на кривой I. По мере разгона двигателя его момент уменьшается по кривой I. Как только значение момента уменьшается до значения некоторого минимального пускового момента  $M_{n \min}$ , переключением в положение 2 выводится из цепи ротора ступень сопротивления реостата.

Теперь процесс пуска будет переведен на кривую II, и пусковой момент двигателя вновь достигает значения  $M_{n \max}$ . Далее, процесс пуска идет с последовательными переключениями реостата в положения 3, 4 соответствующими выводами из цепи ротора ступеней сопротивлений и переводами на кривые III, IV.

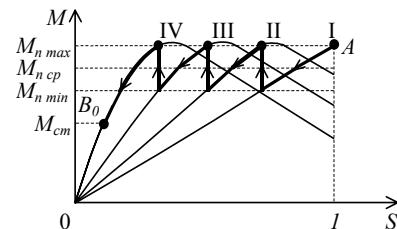


Рис. 7.16. Зависимость  $M=f(S)$  в процессе пуска асинхронного двигателя с фазным ротором

После того, как вращающий момент уменьшается по кривой IV до значения  $M_{cm}$ , равного значению статического момента сопротивления на валу двигателя, частота вращения ротора достигнет установившегося

значения, и процесс пуска двигателя будет закончен (точка  $B$ ). Таким образом, в течение всего процесса пуска значение пускового момента остается приблизительно равным  $M_{n_{cp}}$ .

### 7.16.2. Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Так как в короткозамкнутых двигателях отсутствует возможность увеличения сопротивлений в цепи ротора, то все способы по снижению пускового тока сводятся к снижению подводимого к двигателю напряжения.

Ввиду квадратичной зависимости врачающего момента от напряжения (7.43) способ пуска при пониженном напряжении обладает существенным недостатком, заключающимся в резком снижении пускового момента двигателя. Поэтому такой способ не применяется для пуска двигателя при значительной нагрузке на его валу.

Существует несколько способов понижения подводимого к двигателю напряжения. Рассмотрим некоторые из них.

В маломощных сетях, сечение проводов которых невелико, для ограничения пускового тока посредством снижения напряжения применяют пуск с переключением обмотки со звезды на треугольник (рис. 7.17, а), также пуск с активным или индуктивным сопротивлениями, включенными в цепь обмотки статора (рис. 7.17, б и в).

Если для нормального режима работы двигателя необходимо соединить обмотки статора треугольником или напряжение сети соответствует соединению обмотки только треугольником, то можно

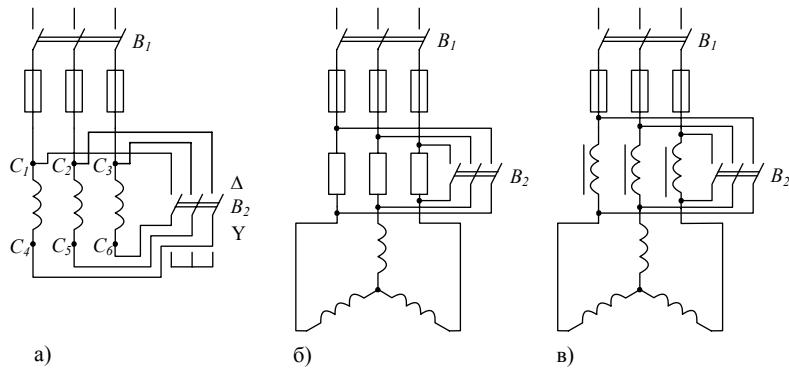


Рис. 7.17. Схемы пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором  
переключением обмотки статора со звезды на треугольник (а), включением ак-  
тивных (б) и индуктивных (в) сопротивлений в цепь обмотки статора

использовать для пуска двигателя способ переключения статорной обмотки со звезды на треугольник.

В момент подключения двигателя к сети переключатель ставят в положение «звезда», обозначенное символом «Y», при котором обмотка статора оказывается соединенной в звезду. При этом фазное напряжение обмотки статора понижается в  $\sqrt{3}$  раз по сравнению с соединением обмотки треугольником. Во столько же раз уменьшается и ток в фазных обмотках статора. Так как при соединении звездой линейный ток равен фазному, а при соединении этих же обмоток треугольником линейный ток больше фазного в  $\sqrt{3}$  раз.

Следовательно, переключив обмотки статора звездой, добиваемся уменьшения линейного тока в  $(\sqrt{3})^2 = 3$  раза. После разгона двигателя обмотку статора переключают в треугольник с помощью перевода переключателя в положение «треугольник», обозначенное символом « $\Delta$ ».

Для понижения напряжения и ограничения пускового тока на время пуска последовательно с обмоткой статора можно включить элементы с активным (рис. 7.17,б) или индуктивным (рис. 7.17,в) сопротивлениеми. Перед пуском выключатель  $B_2$  устанавливают в выключенное положение, затем включают выключатель  $B_1$ . После разбега ротора двигателя включают  $B_2$ , чем шунтируются эти элементы.

Также пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором можно осуществить при понижении напряжения с помощью трехфазного автотрансформатора.

#### 7.17. ПОТЕРИ И КПД АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Мощность, потребляемая асинхронным двигателем из сети, равна:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

где  $m_1$  – количество фаз статорной обмотки;

$U_1$  и  $I_1$  – напряжение и ток фазы статора.

Потери мощности в статоре складываются из потерь мощности на нагрев статорных обмоток с сопротивлениями фаз  $r_1$

$$\Delta P_{o\delta 1} = m_1 r_1 I_1^2$$

и из потерь мощности в стали статора, т.е. на вихревые токи и на перемагничивание сердечника статора  $\Delta P_{cm1}$ .

Основная часть мощности  $P_1$  за вычетом потерь в статоре передается электромагнитным полем на ротор через зазор, и называется она электромагнитной мощностью  $P_{em}$ .

Потери мощности в роторе так же, как и в статоре, складываются из потерь на нагрев обмоток ротора  $\Delta P_{o\delta 2} = m_2 r_2 I_2^2$  и потерь на стали ротора  $\Delta P_{cm2}$ . Потери в стали ротора обычно пренебрежимо малы, благодаря

тому, что частота  $f_2$  в роторе весьма мала. Практически  $\Delta P_{cm2}$  не учитывают.

Механическая мощность  $P_{mex}$ , развиваемая на валу двигателя, меньше электромагнитной мощности  $P_{em}$  на значение  $\Delta P_{ob2}$  потерю в обмотке ротора:

$$P_{mex} = P_{em} - \Delta P_{ob2}.$$

При вращении ротора возникают механические потери  $\Delta P_{mex}$ , обусловленные трением в подшипниках, трением щеток о контактные кольца (у двигателя с фазным ротором) и трением вращающихся частей о воздух (вентиляционные потери).

Полезная механическая мощность на валу двигателя равна:

$$P_2 = P_{mex} - \Delta P_{mex}.$$

Если известны суммарные потери, равные:

$$\Delta P = \Delta P_{ob1} + \Delta P_{cm1} + \Delta P_{ob2} + \Delta P_{mex},$$

то коэффициент полезного действия двигателя равен:

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

Общие или суммарные потери зависят от величины нагрузки, то и КПД двигателя является функцией нагрузки.

Максимальное значение КПД двигателя достигается при нагрузке, близкой к номинальной.

Двигатели малой и средней мощностей имеют КПД в пределах 70 – 90%, двигатели большой мощности имеют КПД 90 – 97%.

#### 7.18. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При эксплуатации асинхронных двигателей практический интерес представляет изменение параметров, характеризующих работу двигателя в зависимости от степени его загрузки. Эти зависимости называются рабочими характеристиками, и к числу их относятся зависимости частоты вращения  $n$ , вращающего момента  $M$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$ , тока статора  $I_1$  и скольжения  $S$  от полезной мощности  $P_2$ .

Все рабочие характеристики снимаются при номинальных значениях частоты  $f$  и напряжения на зажимах статора  $U_1$ , рис. 7.18.

Зависимость частоты вращения  $n$  от полезной мощности  $P_2$ , т.е.  $n = f(P_2)$  мало отличается от механической характеристики двигателя

$n = f(M)$ . Обычно при малых механических потерях можно принять  $P_2 = P_{\text{мех}}$ , а механическая мощность определяется вращающим моментом и угловой частотой вращения ротора  $P_{\text{мех}} = \omega M = 2\pi n M$ .

Учитывая последние два выражения, можно представить зависимость  $M = f(P_2)$  в виде:

$$M = \frac{P_2}{2\pi n}.$$

Так как с увеличением  $P_2$  (увеличение нагрузки) частота вращения ротора  $n$  несколько уменьшается, то зависимость  $M = f(P_2)$  несколько отклоняется от линейной.

Коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  при малых нагрузках на двигатель мал.

При холостом ходе двигателя угол  $\varphi_1$  близок  $90^\circ$ , ток статора  $I_1$  в основном состоит из реактивного тока, идущего на создание основного магнитного потока машины и  $\cos \varphi_1$  имеет значение не более, чем 0,2.

С увеличением нагрузки на двигатель возрастает активная составляющая тока  $I_1$ , а величина реактивного намагничивающего тока из-за постоянства напряжения и магнитного потока остается почти неизменной. Следовательно,  $\cos \varphi_1$  с увеличением нагрузки и мощности  $P_2$  увеличивается, в области номинальной нагрузки коэффициент мощности достигает до 0,8-0,9. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением  $\cos \varphi_1$ , что объясняется увеличением индуктивного сопротивления ротора ( $x_2S$ ) за счет увеличения скольжения, а следовательно, согласно векторной диаграммы двигателя, увеличения углов сдвига  $\psi_2$  и  $\varphi_1$ .

Неполная загруженность асинхронных двигателей является одной из главных причин низкого  $\cos \varphi$ . В целях экономичного использования электроэнергии повышают  $\cos \varphi$  посредством наиболее полной загрузки асинхронных двигателей в пределах их номинальных мощностей.

## 7.19. РЕВЕРСИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

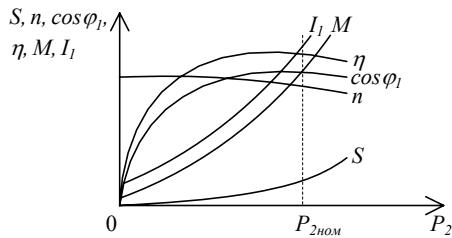


Рис. 7.18. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

## АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Реверсированием называют изменение направления вращения ротора двигателя. Как известно, направление вращения ротора определяется направлением вращения магнитного поля статора. А последнее зависит от порядка чередования фаз. На рис. 7.19 дана схема реверсирования двигателя.

Частота вращения магнитного поля и связанная с ней частота вращения двигателя зависят (7.1) от частоты тока  $f$  и числа пар полюсов  $p$ .

Для плавного регулирования частоты вращения в принципе можно изменять частоту питающего тока, но это требует наличия генератора с плавно изменяющейся частотой на выходе.

Ступенчатое изменение частоты вращения двигателя осуществимо ценой усложнения и удорожания конструкции асинхронного двигателя - это регулирование числа пар полюсов двигателя. Оба названных выше способа не нашли сколько-нибудь широкого практического применения.

В трехфазных асинхронных двигателях с фазным ротором используется реостатный способ регулирования частоты вращения ротора. Регулировочный реостат включают в цепь фазных обмоток ротора аналогично пусковому реостату. В отличие от пускового регулировочный реостат рассчитывается на длительную нагрузку током. Увеличение активного сопротивления цепи ротора изменяет вид характеристики  $n = f(M)$  - делает ее более мягкой (рис. 7.20).

При  $M = \text{const}$  частота вращения двигателя тем меньше, чем больше сопротивление регулировочного реостата  $r_p$ .

При сопротивлении реостата  $r_p = 0$ , двигатель развивает частоту  $n$ .

Если  $r_p > r_p$ , то  $n < n$  и т.д.

Обычно изменение сопротивления регулировочного реостата осуществляют ступенями, поэтому не достигается плавность регулирования вращения. Этим путем возможно изменять частоту вращения ротора в пределах от синхронной до полной остановки. При

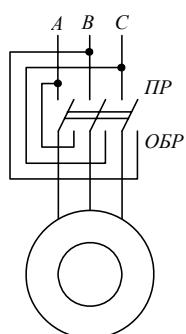
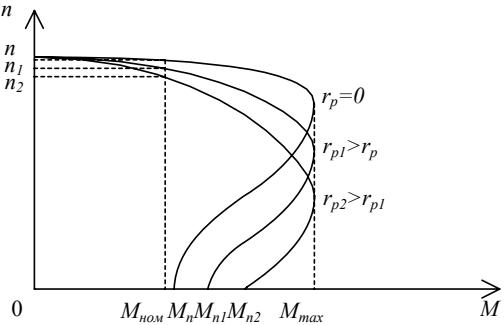


Рис. 7.19. Схема реверсирования асинхронного двигателя

Рис. 7.20. Механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором при различных значениях сопротивлений регулировочного реостата



таком способе регулирования неизбежны относительно большие потери энергии из-за нагрева обмотки реостата.

#### 7.20. ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Однофазный асинхронный двигатель имеет одну обмотку в статоре, рассчитанную на одну фазу переменного тока, и обычно короткозамкнутый ротор, рис. 7.21,а.

Переменный синусоидальный ток, протекающий по обмотке статора двигателя, возбуждает переменный синусоидальный магнитный поток  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ .

Этот поток имеет пульсирующий характер, его ось совпадает с осью обмотки (катушки) и неподвижна в пространстве. Известно, что принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля. Машина с пульсирующим магнитным полем не создает пускового момента, но при выполнении определенных условий она может работать в двигательном режиме.

Пульсирующий магнитный поток  $\Phi$  можно представить как результат сложения двух вращающихся с одинаковой частотой, в противоположных направлениях потоков, величины которых равны  $\Phi_I$  и  $\Phi_{II}$ . Эта представлена в виде векторной диаграммы на рис. 7.21(б).

Величины потоков и их частоты вращений между собою равны:

$$\Phi_I = \Phi_{II} \quad \text{и} \quad \omega_I = \omega_{II}.$$

Каждый из вращающихся потоков  $\Phi_I$  и  $\Phi_{II}$  в результате взаимодействия с токами, индуцируемыми в обмотке ротора  $I_{2I}$  и  $I_{2II}$ , создает равные по величине, но противоположные по направлению вращающие моменты  $M_I$  и  $M_{II}$ :

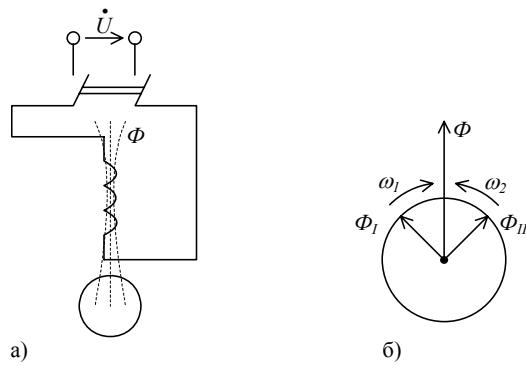


Рис. 7.21. Однофазный асинхронный двигатель: (а) схема с одной обмоткой, (б) разложение пульсирующего потока  $\Phi$  на два вращающихся потока  $\Phi_I$  и  $\Phi_{II}$

$$M_I = CI_{2I} \cos \psi_{2I} \Phi_I,$$

$$M_{II} = CI_{2II} \cos \psi_{2II} \Phi_{II}.$$

При неподвижном роторе эти моменты равны, и результирующий момент, действующий на ротор, равен  $M = M_I - M_{II} = 0$ . Следовательно, для двигателя с одной статорной обмоткой пусковой момент отсутствует.

Если раскрутить ротор с помощью внешней силы в одном из направлений, то ротор будет вращаться дальше под действием электромагнитного вращающего момента в этом же направлении.

Для доказательства сказанного рассмотрим изменение момента в зависимости от изменения величин, определяющих этот момент в процессе механического пуска.

Если раскрутить ротор в направлении вращения потока  $\Phi_I$ , то индуцируемая им в роторе ЭДС  $E_{2I}$  и ток  $I_{2I}$  будут иметь частоту  $f_{2I} \approx 0$ , т.к. скольжение у ротора двигателя в этом случае очень мало.

Поэтому и реактивное сопротивление ротора, пропорциональное этой частоте, будет пренебрежимо малым. Следовательно,  $\cos \psi_{2I} \approx 1$ , т.е. имеет наибольшее значение, и вращающий момент  $M_I$ , определяемый активной составляющей тока  $I_{2I} \cos \psi_{2I}$ , будет достаточно большим.

Магнитный поток  $\Phi_{II}$  в рассматриваемом случае вращается в сторону, обратную вращению ротора. Индуцируемая им в роторе ЭДС  $E_{2II}$  и ток  $I_{2II}$  имеют большую частоту, т.к. относительная скорость ротора и потока  $\Phi_{II}$  равна примерно удвоенной частоте вращения потока, т.е.

$S \approx 2$ . При этом реактивное сопротивление ротора по отношению к его активному сопротивлению будет достаточно большим, что  $\psi_2 \approx 90^\circ$  или  $\cos\psi_2 \approx 0$  и вращающий момент  $M_{II}$  будет незначительным. Результирующий вращающий момент будет определяться моментом

$$M = M_I - M_{II}.$$

Таким образом, рассмотренный двигатель требует внешнего запуска.

Для пуска в ход однофазного асинхронного двигателя применяют специальную пусковую обмотку (*ПО*), ось которой располагается на статоре под углом  $90^\circ$  к оси рабочей обмотки (*РО*). Последовательно с пусковой обмоткой включают конденсатор *C*, благодаря которому ток  $I_{II}$  в этой обмотке опережает по фазе напряжение сети *U* на время, близкое четверти периода, и эту обмотку включают параллельно с рабочей (рис. 7.22).

Благодаря пространственному смещению осей обмоток и временному сдвигу токов в обмотках статора, возникает вращающееся магнитное поле, которое и создает начальный пусковой момент. Когда ротор достигнет заданной скорости, пусковую обмотку отключают. При постоянно включенной обмотке с конденсатором двигатель называется конденсаторным. В этом случае для получения наибольшего пускового момента параллельно с рассмотренной емкостью включают еще пусковую емкость, которую отключают после окончания пуска.

### 7.21. ОДНОФАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С РАСПЩЕПЛЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ

Этот тип двигателя отличается устройством статора. Статор имеет явно выраженные полюса, на которых расположена рабочая обмотка *I*, подключаемая к однофазному напряжению, рис. 7.23. Полюса имеют разрез, делящий его на две неравные части. Меньшая часть охватывается медным кольцом *2*, играющим роль как бы вторичной короткозамкнутой обмотки трансформатора.

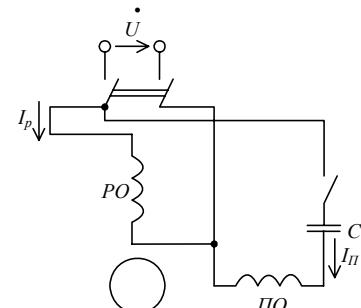


Рис. 7.22. Однофазный асинхронный двигатель с пусковой обмоткой

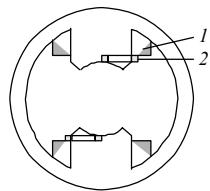


Рис. 7.23. Однофазный асинхронный двигатель с расщепленными полюсами

Ток, возникающий в кольце, значительно отстает по фазе от тока по рабочей обмотке при включении ее в сеть. Ток кольца создает магнитный поток, смещенный по фазе относительно основного потока. Таким образом, два магнитных потока, смещенных в пространстве по фазе, создают вращающееся поле, приводящее в движение короткозамкнутый ротор. Эти двигатели изготавливаются совсем маломощными и широко применяются в качестве привода исполнительных механизмов в устройствах автоматики.

#### 7.22. ВКЛЮЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ОДНОФАЗНУЮ СЕТЬ

На практике возникает необходимость использования трехфазных двигателей при включении их в однофазную сеть. На основании изложенных принципов работы однофазных двигателей нетрудно выполнить схему соединения обмоток трехфазного двигателя для питания его от однофазной сети. При этом используется конденсатор в качестве пускового или рабочего элемента, на рис. 7.24 приведены эти схемы.

Мощность асинхронных трехфазных двигателей, включаемых в однофазную сеть, уменьшается по сравнению с их номинальной мощностью на 50 – 60%.

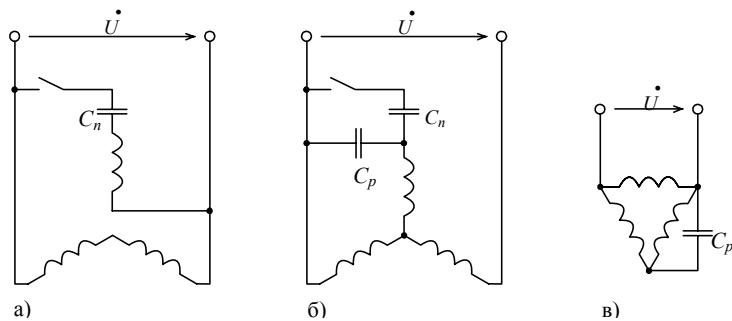


Рис. 7.24. Возможные схемы включения трехфазных асинхронных двигателей в однофазную сеть

### Глава восьмая

## СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

## 8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Синхронная машина - это машина переменного тока, у которой в установившемся режиме ротор вращается с такой же частотой, как и магнитное поле, создаваемое токами статорных обмоток.

Совпадение этих движений по частоте определяется понятием «синхронный». Синхронные машины, как и все электрические машины, обладают свойством обратимости, т.е. могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Основной областью применения синхронных машин является использование их в качестве промышленных генераторов для выработки электрической энергии на электростанциях. Эти генераторы приводятся во вращение первичными двигателями - паровыми, газовыми и гидравлическими турбинами.

Синхронные двигатели обычно применяют в приводах большой мощности. Они приводят в движение насосы, компрессоры, вентиляторы и другие механизмы, работающие с неизменной скоростью.

Синхронные двигатели малой мощности от долей ватта до нескольких десятков ватт используются в устройствах, где требуется строгое постоянство скорости: электрические часы, автоматические самопищащие приборы, устройство с программным управлением и др.

На мощных подстанциях электроэнергетических систем устанавливают синхронные машины, работающие в режиме холостого хода и компенсирующие реактивную мощность с целью повышения коэффициента мощности системы. Они называются синхронными компенсаторами.

## 8.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

### ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Трехфазный генератор создан в 1888 г. русским изобретателем - электротехником М.О. Доливо-Добровольским.

Синхронный генератор, как и прочие электрические машины, имеет две основные части: неподвижный статор и вращающийся ротор.

Статор конструктивно не отличается от статора асинхронной машины. Сердечник статора в совокупности с обмоткой статора называется еще и якорем машины.

Ротор синхронного генератора представляет собой электромагнит, по обмотке возбуждения которого пропускают постоянный ток.

Устройство и принцип действия синхронных генераторов однофазного и трехфазного токов рассмотрены в §§ 1.2 и 2.2.

Число пар полюсов магнитного поля возбуждения  $p$ , как было отмечено, определяется в зависимости от частоты вращения  $n$  первичного двигателя при условии постоянства частоты тока ( $f = 50$  Гц) с помощью формулы

$$p = \frac{60f}{n}.$$

Гидравлические турбины обычно имеют малую частоту вращения, примерно десятки оборотов в минуту, а паровые турбины являются быстроходными и развиваю частоту вращения до 1500-3000 об/мин.

Генераторы, соединенные с гидротурбинами, называются гидрогенераторами, их роторы выполняются многополюсными. Роторы генераторов, смонтированных в агрегате с паровыми турбинами - турбогенераторы, изготавливаются двух или четырехполюсными.

Ротор синхронных генераторов бывает явнополюсным и неявнополюсным (рис. 8.1).

По условиям механической прочности в быстроходных генераторах применяются роторы с неявно выраженным полюсами. А в тихоходных - роторы обычно выполняются явнополюсными.

Обмотка возбуждения роторов синхронных генераторов питается от специальных генераторов постоянного тока - возбудителей. Якорь возбудителя помещается на одном валу с ротором. Ток от возбудителя в обмотку возбуждения ротора поступает через контактные кольца, которые также установлены на общем валу.

Мощность возбудителя составляет 1 – 3% мощности генератора. Маломощные синхронные генераторы, как правило, имеют самовозбуждение.

Синхронный генератор представлен в виде его схемы на рис. 8.2.

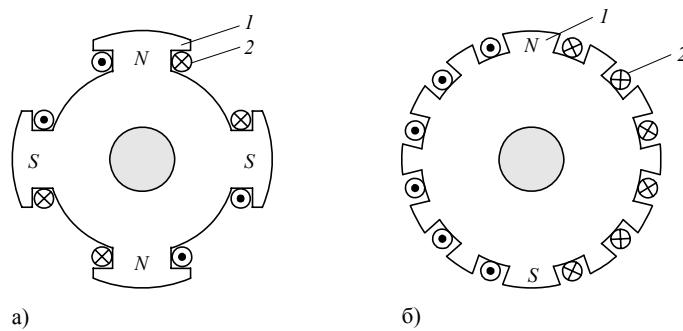
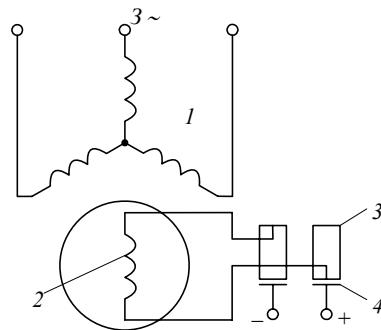


Рис. 8.1. Поперечное сечение явнополюсного (а) и неявнополюсного (б) роторов:  
1 - полюс; 2 - обмотка возбуждения

Рис. 8.2. Схема синхронного генератора:  
1 - обмотка статора, 2 - обмотка ротора или  
возбуждения, 3 - контактные кольца, 4 - щетки



Для получения синусоидальной ЭДС в обмотке статора добиваются синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре синхронных генераторов, выбирая форму полюсов ротора.

При холостом режиме генератор отключен от нагрузки, ток по обмотке статора (якоря) равен нулю, ротор вращается с номинальной частотой  $n$ . Ток возбуждения  $I_b$ , поступающий в цепь ротора, возбуждает магнитный поток  $\Phi_0$ . Этот поток, вращаясь вместе с ротором, пересекает обмотки статора, смещенные в пространстве относительно друг друга на  $120^\circ$ , и в каждой фазной обмотке индуцирует ЭДС, величина которой, согласно (7.3), равна

$$E_0 = 4,44 \kappa_{ob} W f \Phi_0,$$

где  $\kappa_{ob}$  - обмоточный коэффициент статора;

$W$  - число витков обмотки статора;

$\Phi_0$  - максимальный поток полюса ротора (поток возбуждения).

В режиме нагрузки напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС на величину внутреннего падения напряжения

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - z \dot{I},$$

где  $z$  - полное сопротивление обмотки фазы статора;

$\dot{I}$  - ток в обмотке статора.

### 8.3. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ И РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

При включении статорной обмотки синхронного генератора к нагрузке по этим фазным обмоткам появляется трехфазный ток, который создает вращающееся магнитное поле. Ротор и его магнитное поле вращаются с той же частотой, что и магнитное поле токов статора. Благодаря этому свойству, как было отмечено, генератор называется синхронным. При наложении полей ротора и статора в машине образуется результирующее магнитное поле. Результат взаимодействия этих полей

определяется величиной и характером нагрузки. Воздействие магнитного поля статора (якоря) на поле ротора (основное магнитное поле) называется реакцией якоря.

Рассмотрим реакцию якоря при различных по характеру нагрузках.

В случае активной нагрузки (рис. 8.3,а) ЭДС и ток статорной обмотки совпадают по фазе ( $\psi = 0$ ), они одновременно достигают максимума в рассматриваемой обмотке  $AX$  в тот момент, когда ось магнитного потока  $\Phi_0$  ротора пересекает проводники этой обмотки.

Ось магнитного потока статора (якоря)  $\Phi_a$  совпадает с осью катушки  $AX$ , где в данный момент ток максимальен. Как видно из рисунка, потоки  $\Phi_0$  и  $\Phi_a$  взаимно перпендикулярны. Получаемый в результате сложения этих потоков результирующий магнитный поток генератора  $\Phi$  несколько увеличивается относительно основного потока - потока ротора  $\Phi_0$  и смещается в пространстве на угол  $\theta$ . Угол  $\theta$ , образованный между векторами потоков полюсов ротора  $\Phi_0$  и результирующего потока  $\Phi$ , называется углом рассогласования.

Следовательно, реакция якоря при активной нагрузке несколько усиливает магнитное поле и ЭДС генератора.

В случае индуктивной нагрузки (рис. 8.3,б) ток отстает от ЭДС по фазе на  $\psi = 90^\circ$ . Поэтому ток достигает максимума в рассматриваемой обмотке  $AX$ , когда ротор будет повернут на  $90^\circ$  относительно плоскости этой обмотки. Магнитные потоки  $\Phi_0$  и  $\Phi_a$  направлены в противоположные стороны.

Реакция якоря при индуктивной нагрузке размагничивает машину и уменьшает ЭДС.

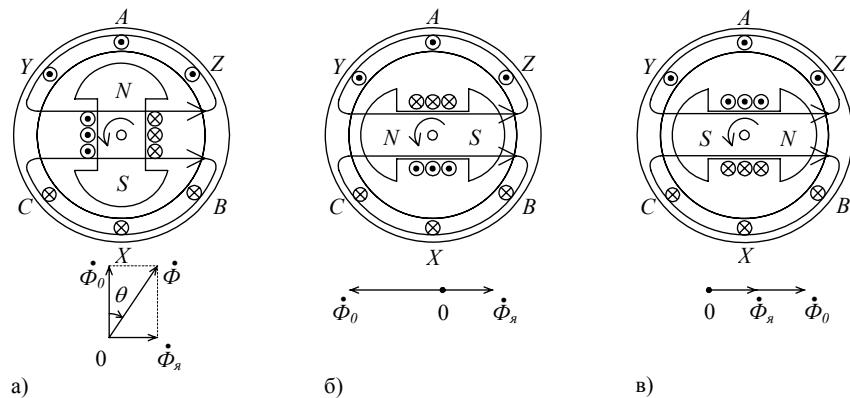


Рис. 8.3. Положения ротора в моменты максимальных значений тока в обмотке  $AX$  и векторные диаграммы магнитных потоков

При емкостной нагрузке (рис. 8.3,в) генератора ток опережает по фазе ЭДС на  $\psi = 90^\circ$ , т.е. ток в обмотке  $AX$  достигает максимума в момент, когда ось магнитного потока ротора  $\Phi_0$  еще не дошла до плоскости рассматриваемой обмотки на  $90^\circ$ . Потоки  $\Phi_0$  и  $\Phi_y$  совпадают по направлению.

Реакция якоря при емкостной нагрузке усиливает магнитный поток машины, увеличивает ЭДС.

Ввиду взаимной перпендикулярности потоков  $\Phi_0$  и  $\Phi_y$  при активной нагрузке, реакция якоря в этом случае называется поперечной. При реактивных нагрузках на генератор потоки  $\Phi_0$  и  $\Phi_y$  направлены по одной линии, и реакция якоря в этом случае называется продольной.

На основе сказанного можно заключить, что реакция якоря оказывает размагничивающее действие на машину при активно-индуктивной нагрузке, а намагничивающее действие - при активно-емкостной нагрузке генератора.

Изменение величины и характера нагрузки в результате реакции якоря приводит к изменению результирующего магнитного потока и величины ЭДС генератора, что в итоге неблагоприятно сказывается на работе потребителей электрической энергии.

Уменьшения влияния реакции якоря можно добиться увеличением сопротивления магнитной цепи машины посредством увеличения зазора между статором и ротором. Однако этот метод нерационален с точки зрения затрат на конструкцию. На практике применяются автоматические устройства, обеспечивающие изменение тока возбуждения при изменении нагрузки; этим ослабляют влияние реакции якоря.

#### 8.4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

К числу основных характеристик синхронного генератора относятся характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная характеристики.

Характеристика холостого хода - есть зависимость ЭДС статора  $E_0$  от тока возбуждения  $I_b$  при токе статора  $I = 0$ , частоте вращения  $n = const$ .

Так как основной магнитный поток  $\Phi_0$  создается током возбуждения, а между ЭДС  $E_0$  и потоком  $\Phi_0$  имеет место линейная зависимость, то характеристика холостого хода генератора  $E_0 = f(I_b)$  имеет тот же вид, что зависимость  $\Phi_0 = f(I_b)$ , т.е. вид кривой намагничивания (рис. 8.4).

Внешняя характеристика - это зависимость напряжения  $U$  на зажимах обмотки статора от тока нагрузки  $I$ , т.е.  $U = f(I)$  при  $I_b = const; \cos \varphi = const; n = n_{nom} = const$ .

На рис. 8.5 даны внешние характеристики генератора с учетом реакции якоря при различных характеристиках нагрузки:

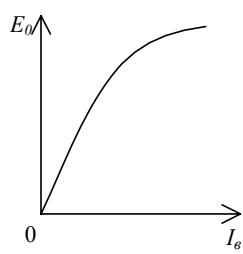


Рис. 8.4. Характеристика холостого хода синхронного генератора

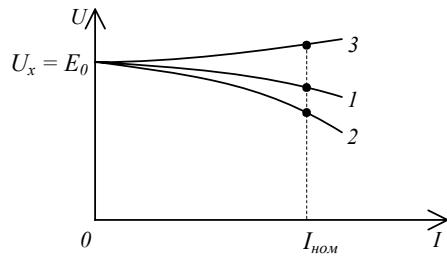


Рис. 8.5. Внешние характеристики синхронного генератора

- 1 - активной ( $\varphi = 0$ );
- 2 - активно-индуктивной ( $\varphi > 0$ );
- 3 - активно-емкостной ( $\varphi < 0$ ).

Характеристика генератора оценивается относительным изменением напряжения генератора по формуле:

$$\Delta U = \frac{U_x - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%,$$

где  $U_x$  и  $U_{\text{ном}}$  – соответственно напряжения при холостом ходе и при номинальной нагрузке.

Это изменение напряжения при  $\cos \varphi = 0,8$  у некоторых генераторов доходит до 35 – 45%.

Регулировочная характеристика является зависимостью тока возбуждения  $I_b$  от тока нагрузки при постоянстве напряжения  $U$ , т.е. эта характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения при изменении тока нагрузки генератора, чтобы поддерживать  $U = \text{const}$ .

На рис. 8.6 даны регулировочные характеристики  $I_b = f(I)$  при разных характеристиках нагрузки: 1 – активной ( $\varphi = 0$ ); 2 – активно-индуктивной ( $\varphi > 0$ ); 3 – активно-емкостной ( $\varphi < 0$ ).

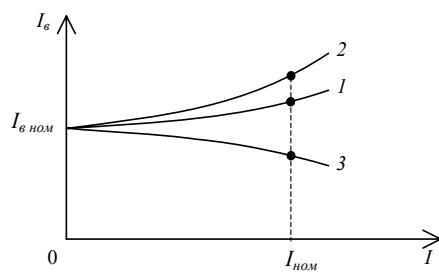


Рис. 8.6. Регулировочные характеристики синхронного

## 8.5. УРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФАЗЫ СТАТОРА.

### СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА

#### СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Для анализа работы синхронной машины используются: уравнение электрического состояния, схема замещения и векторная диаграмма. При включении статорных обмоток к нагрузкам, как указывалось, токи статора создают вращающееся магнитное поле статора с потоком  $\dot{\Phi}_s$ . Этот изменяющийся поток наводит в самой обмотке статора синусоидальную ЭДС самоиндукции  $\dot{E}_s$ . Так как основной поток  $\dot{\Phi}_0$  и поток статора  $\dot{\Phi}_s$  вращаются синхронно, то они взаимно неподвижны, и результирующий поток машины можно получить векторным или комплексным сложением их:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_s. \quad (8.1)$$

Также можно найти результирующее значение ЭДС фазы статора:

$$\dot{E}_{pes} = \dot{E}_0 + \dot{E}_s. \quad (8.2)$$

Согласно написанным выражениям, построим векторную диаграмму потоков и соответствующие им ЭДС (рис. 8.7). Сначала строим вектор  $\dot{\Phi}_0$  и отстающий от него на  $90^\circ$  вектор  $\dot{E}_0$ ; затем относительно  $\dot{E}_0$ , в случае активно-индуктивной нагрузки, под углом  $\psi$  проводим вектор тока  $\dot{I}$ ; поток статора  $\dot{\Phi}_s$  совпадает по фазе с током статора  $\dot{I}$ , поэтому эти вектора параллельны;  $\dot{E}_s$  проводим под  $90^\circ$  к  $\dot{\Phi}_s$ . Затем проводим результирующие, замыкающие вектора  $\dot{\Phi}$  и  $\dot{E}_{pes}$ .

Уравнение электрического состояния фазы генератора при напряжении  $\dot{U}$  на нагрузке и с учетом активного сопротивления проводов обмотки  $r$  и индуктивного сопротивления рассеяния  $x_{pac}$  можно записать:

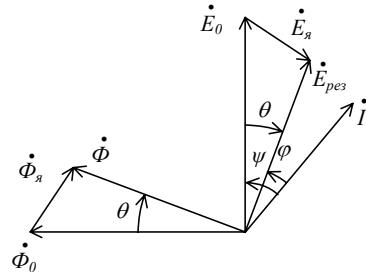
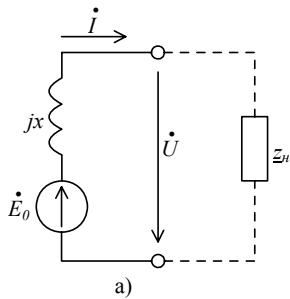
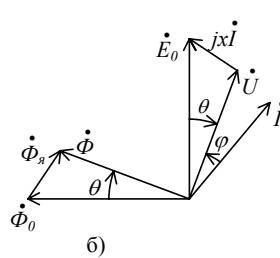


Рис. 8.7. Векторная диаграмма магнитных потоков и ЭДС синхронного генератора



а)



б)

Рис. 8.8. Схема замещения (а) и векторная диаграмма, (б) фазы синхронного генератора

$$\dot{E}_{pe3} = \dot{U} + r\dot{I} + jx_{pac}\dot{I}. \quad (8.3)$$

ЭДС самоиндукции обмотки статора можно выразить через падение напряжения на индуктивном сопротивлении  $x_a$  этой обмотки :

$$\dot{E}_a = -jx_a\dot{I}. \quad (8.4)$$

На основе выражений (8.2), (8.3), (8.4) получим:

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + r\dot{I} + j(x_{pac} + x_a)\dot{I}. \quad (8.5)$$

Сумму индуктивных сопротивлений  $x_{pac} + x_a = x$  называют синхронным индуктивным сопротивлением синхронной машины. Обычно активное сопротивление обмотки статора  $r$  пренебрежимо мало, тогда можно написать упрощенное уравнение электрического состояния каждой фазы генератора:

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jx\dot{I}. \quad (8.6)$$

Полученному уравнению синхронного генератора соответствуют схема замещения (рис. 8.8,а) и векторная диаграмма (рис. 8.8,б).

#### 8.6. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

На электрических станциях обычно устанавливают несколько генераторов, включенных параллельно и работающих на общую нагрузку. Это дает возможность увеличить мощность электростанции, повысить надежность электроснабжения потребителей.

Включение генераторов на параллельную работу является ответственной задачей, так как при неправильном включении могут возникнуть недопустимо большие токи, опасные для самих генераторов и для других элементов электрооборудования.

При включении синхронного генератора в сеть на параллельную работу необходимо соблюдать следующие условия: ЭДС генератора в

момент включения его к сети должна быть по величине равна и противоположна по фазе напряжению сети ( $\dot{E}_0 = -\dot{U}_C$ ); частота ЭДС генератора  $f_g$  должна быть равна частоте напряжения сети  $f_C$ ; порядок чередования фаз на выводах генератора должен быть таким же, что и на включаемых зажимах сети.

Известно, что изменение величины ЭДС генератора достигается изменением тока возбуждения, а регулирование ее частоты - изменением частоты вращения ротора от первичного двигателя. Приведение генератора в состояние, удовлетворяющее всем указанным условиям, называется синхронизацией. Осуществление синхронизации контролируется прибором, называемым синхроископом. По конструкции синхроископы делятся на ламповые и стрелочные. Рассмотрим процесс синхронизации генераторов с применением лампового синхроископа, который состоит из трех ламп (рис. 8.9 а).

Момент синхронизации соответствует одновременному погасанию всех ламп. Предположим, что звезда ЭДС генератора  $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  вращается с угловой частотой  $\omega_g$ , превышающей угловую частоту вращения  $\omega_C$  звезды напряжений сети  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ .

Напряжение на лампах определяется суммой  $\dot{E}_A + \dot{U}_A$ ;  $\dot{E}_B + \dot{U}_B$ ;  $\dot{E}_C + \dot{U}_C$  (рис. 8.9,б). В момент совпадения векторов ЭДС и напряжения одноименных фаз эта сумма достигнет наибольшего значения, при этом лампы горят с наибольшим накалом (напряжение на лампах равно удвоенному напряжению сети). При дальнейшем вращении звезды ЭДС все

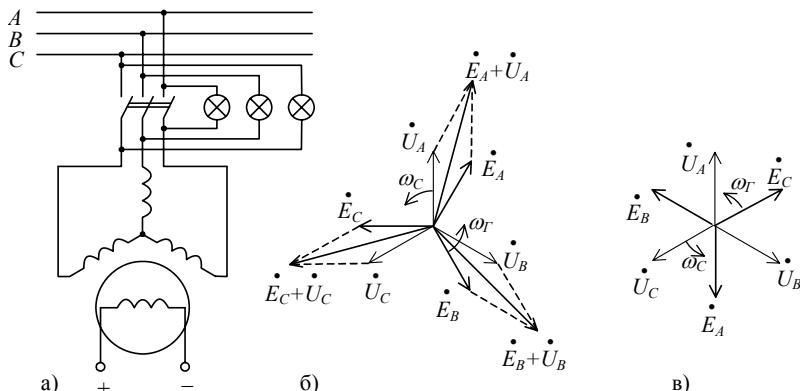


Рис. 8.9. Ламповый синхроископ: (а) схема включения, (б, в) векторная диаграмма для пояснения контроля синхронизации

больше опережает звезду напряжений, угол между векторами одноименных величин напряжений и ЭДС увеличивается, а сумма их уменьшается, накал ламп уменьшается. В момент синхронизации векторы ЭДС и напряжений занимают положение (рис. 8.9,в), при котором  $\dot{E}_A + \dot{U}_A = 0$ ,  $\dot{E}_B + \dot{U}_B = 0$ ,  $\dot{E}_C + \dot{U}_C = 0$ , и все три лампы одновременно гаснут. При большом отличии частот сети и генератора лампы вспыхивают часто. Изменяя частоту вращения первичного двигателя, добиваются равенства  $f_C = f_\Gamma$  или  $\omega_C = \omega_\Gamma$ , о чем будет свидетельствовать погасание ламп на длительное время. В этот момент следует включить генератор в сеть.

### 8.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Механическая мощность, получаемая генератором от первичного двигателя, равна

$$P_{\text{мех}} = \omega M, \quad (8.7)$$

где  $M$  - момент сопротивления вращению ротора;

$\omega$  - частота вращения ротора.

Электрическая мощность, отдаваемая трехфазным синхронным генератором при симметричной нагрузке:

$$P = 3UI \cos \varphi, \quad (8.8)$$

где  $U$  и  $I$  - фазные напряжение и ток.

Пренебрегая незначительными потерями в машине и приравнивая механическую и электрическую мощности, получим выражение момента машины:

$$M = \frac{3UI \cos \varphi}{\omega}. \quad (8.9)$$

В установившемся режиме вращающий момент, развиваемый первичным двигателем, уравновешивается тормозным электромагнитным моментом со стороны генератора. Поэтому выражение (8.9) соответствует электромагнитному моменту. При работе синхронной машины в режиме генератора, как отмечено, этот электромагнитный момент является тормозным, а в двигательном режиме машины - вращающим.

Из векторной диаграммы, приведенной на рис. 8.10, следует:

$$xI \cos \varphi = E_0 \sin \theta \quad \text{или} \quad (8.10)$$

$$I \cos \varphi = \frac{E_0 \sin \theta}{x}. \quad (8.11)$$

Полученное выражение активной составляющей тока (8.11) подставляем в формулу (8.9) и находим:

$$M = \frac{3UE_0}{\omega x} \sin \theta. \quad (8.12)$$

Здесь  $\omega$  - частота вращения ротора при количестве пар полюсов ротора  $p = 1$  определяет частоту электрических величин машины.

Выражение (8.12.) можно записать:

$$M = M_{\max} \sin \theta, \quad (8.13)$$

где  $M_{\max} = \frac{3UE_0}{\omega x}$  - максимальный момент.  $(8.14)$

Учитывая выражение (8.7) и приближенное равенство механического и электромагнитного моментов, следует заключить, что электромагнитная мощность машины равна

$$P = \frac{3UE_0}{x} \sin \theta. \quad (8.15)$$

Таким образом, при постоянных значениях  $U, E_0, x$  электромагнитные момент и мощность синхронной машины пропорциональны синусу угла сдвига между осями магнитного поля ротора и результирующего поля (потоков  $\Phi_0$  и  $\Phi$ ).

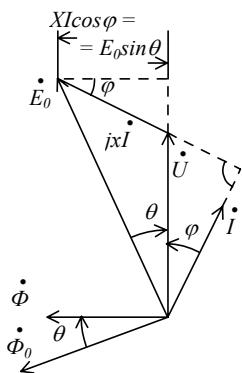


Рис. 8.10. Векторная диаграмма к определению электромагнитного момента синхронной машины

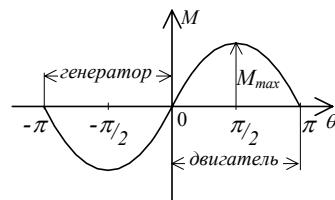


Рис. 8.11. Угловые характеристики синхронной машины

### 8.8. РАБОТА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ ДВИГАТЕЛЯ

В режиме двигателя, как известно, машина потребляет электрическую энергию и преобразует ее в механическую энергию, момент машины является вращающим, а не тормозным, как в режиме генератора. Это

соответствует тому, что в формуле (8.12) угол  $\theta > 0$  (в генераторе  $\theta < 0$ ). Это означает, что в двигателе в отличие от генератора ось поля ротора отстает на угол  $\theta$  от оси результирующего поля. Вращающееся поле статора ведет за собой ротор.

На рис. 8.11 приведены угловые характеристики (зависимость момента  $M$  от угла  $\theta$ ) синхронной машины, построенные на основе формулы (8.13). Область положительных углов  $\theta$  относится к работе машины двигателем, а область отрицательных углов - к работе генератором.

В пределах  $\theta = 0 \div 90^\circ$  машина работает в устойчивом режиме, т.е. любое изменение момента сопротивления приводит к такому же изменению врачающего момента, наступает равновесие этих моментов, и поддерживается синхронная скорость вращения ротора. Номинальный режим машины соответствует  $\theta_{\text{ном}} = 20 \div 30^\circ$ . Максимальный момент, который может развивать двигатель, наступает при  $\theta = 90^\circ$ .

Если момент сопротивления окажется больше врачающего, то двигатель не в состоянии будет его преодолеть и остановится. Отношение  $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$  называется перегрузочной способностью двигателя, для различных двигателей она находится в пределах 2-3.

На рис. 8.12 приведена механическая характеристика синхронного двигателя.

Такая характеристика часто называется абсолютно жесткой, так как частота вращения двигателя в пределах номинального режима остается постоянной и не зависит от изменения момента.

#### 8.9. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В двигательном режиме синхронная машина потребляет из сети ток  $I$ , который направлен навстречу ЭДС  $E_o$ , что показано на схеме замещения (рис. 8.13).

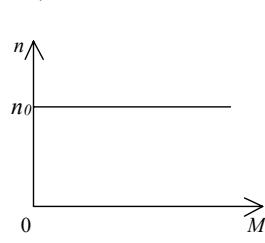


Рис. 8.12. Механическая характеристика синхронного двигателя

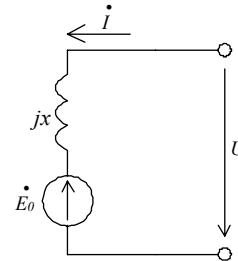


Рис. 8.13. Схема замещения синхронного двигателя

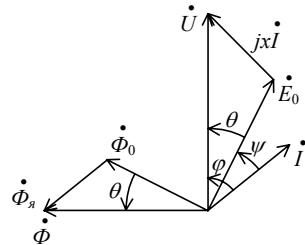


Рис. 8.14. Векторная диаграмма синхронного

двигателя

Тогда уравнение электрического состояния синхронного двигателя имеет вид

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + jx \dot{I}, \quad (8.16)$$

т.е. напряжение сети уравновешивает противо-ЭДС  $E_0$  и индуктивное падение напряжения на синхронном сопротивлении  $x$ .

Векторная диаграмма, построенная по уравнению (8.16), показана на рис. 8.14.

В результате действия механической нагрузки ось магнитного потока ротора  $\Phi_0$  отстает на угол  $\theta$  от оси результирующего магнитного потока  $\Phi$ .

Поэтому в двигательном режиме вектор ЭДС  $\dot{E}_0$  отстает по фазе на угол  $\theta$  от вектора напряжения  $\dot{U}$ .

Сопоставление векторных диаграмм двигателя и генератора показывает, что угол  $\theta$  меняет свой знак. При построении векторной диаграммы двигателя вектор напряжения  $\dot{U}$  принимается за исходный, вектор тока  $\dot{I}$  отстает от ЭДС  $\dot{E}_0$  на  $\psi$ , а от вектора  $jx \dot{I}$  на  $90^\circ$ . Вектора магнитных потоков  $\dot{\Phi}$  и  $\dot{\Phi}_0$  опережают на  $90^\circ$  соответствующие вектора  $\dot{U}$  и  $\dot{E}_0$ .

#### 8.10. СИНХРОННЫЙ КОМПЕНСАТОР

Синхронные компенсаторы - это синхронные машины, специально предназначенные для улучшения коэффициента мощности  $\cos \varphi$  электрической сети. Они устанавливаются на крупных подстанциях. Синхронные компенсаторы работают в режиме двигателя на холостом ходу и загружаются реактивным током.

Известно, что большинство приемников электрической энергии переменного тока (асинхронные двигатели, индуктивные печи и т. д.) потребляет ток активно-индуктивного характера. При увеличении индуктивной составляющей тока коэффициент мощности сети снижается.

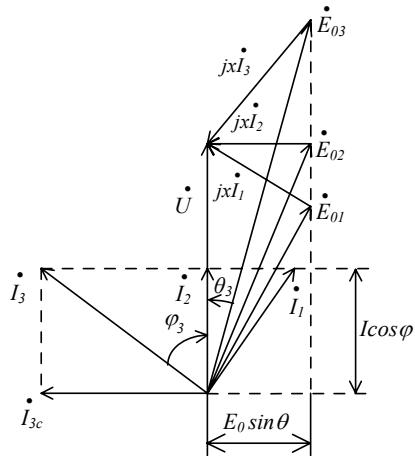


Рис. 8.15. Векторная диаграмма синхронного двигателя при регулировании тока возбуждения

Если компенсировать индуктивную составляющую с помощью емкостного тока, то в принципе можно разгрузить линию от реактивных токов и повысить  $\cos \varphi$ .

Если при неизменной нагрузке синхронного двигателя изменить ток возбуждения  $I_b$ , то будет изменяться величина ЭДС  $E_0$ , а это повлечет изменение и величины фазы тока  $I$ . Перевозбужденный двигатель потребляет опережающий ток, т.е. ток активно-емкостного характера. Недовозбужденный двигатель потребляет отстающий ток, т.е. ток активно-индуктивного характера.

На рис. 8.15 дана векторная диаграмма, где вектора ЭДС  $E_{01}$ ,  $E_{02}$  и  $E_{03}$  соответствуют режимам недовозбуждения, номинального возбуждения и перевозбуждения двигателя. Как видно, в случае перевозбуждения двигатель потребляет опережающий ток  $I_3$  с его емкостным составляющим  $I_{3c}$ .

Синхронный двигатель в качестве компенсатора включается в сеть в режиме перевозбуждения и при отсутствии нагрузки.

Потребляемый ток состоит в основном из емкостной составляющей, которая компенсирует индуктивную составляющую тока в сети, и тем самым обеспечивается повышение коэффициента мощности линии электроснабжения.

### 8.11. ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Синхронный двигатель не имеет собственного пускового момента: быстро вращающееся поле токов статора не может привести во вращение ротор, обладающий инерцией, так как направление момента меняется с частотой следования полюсов статора. В недалеком прошлом для раскручивания синхронного двигателя применялся другой двигатель, такая

сложность пуска препятствовала широкому применению этих двигателей на практике. В настоящее время применяется достаточно простой метод асинхронного способа пуска синхронных двигателей. Чтобы приспособить двигатель к такому пуску при явнополюсном роторе, в полюсные наконечники закладываются медные или латунные стержни и соединяются на торцах пластинками. Эта конструкция пусковой обмотки напоминает «беличью клетку» асинхронной машины, но занимает лишь часть окружности ротора.

Синхронный двигатель запускают как асинхронный, т.е. обычным включением статорной обмотки в сеть, причем, перед пуском обмотку возбуждения ротора, в которой вращающееся магнитное поле наводит весьма значительную ЭДС, замыкают на пусковое сопротивление. При достижении частоты вращения, близкой к синхронной ( $n \approx 0,95n_0$ ), обмотка возбуждения переключается на источник постоянного тока, и двигатель входит в синхронизм.

В широко применяемых в системе автоматики маломощных синхронных двигателях ротор не имеет обмотки возбуждения. Ротор выполняется в виде постоянного магнита или набирается из плоских пакетов электротехнической стали, как, например, в так называемых реактивных синхронных двигателях. В таких двигателях отпадает необходимость в дополнительном источнике постоянного тока, и пуск в ход их осуществляется обычно непосредственным подключением обмоток статора к электрической сети.

Ротор из постоянных магнитов имеет встроенную в него короткозамкнутую пусковую обмотку, которая обеспечивает асинхронный пуск двигателя. После разгона ротора до необходимой частоты процесс синхронизации осуществляется при взаимодействии вращающихся полей статора и ротора.

Особенность реактивных синхронных двигателей заключается в том, что их ротор набирается из плоских пакетов листовой электротехнической стали. Притом магнитное сопротивление такого ротора бывает различным в различных радиальных направлениях. При пуске этого двигателя разгон ротора осуществляется за счет взаимодействия вихревых токов, возникающих на поверхности ротора и вращающегося магнитного поля. В процессе разгона плоские пакеты во вращающемся поле статора перемагничиваются. Частота перемагничивания уменьшается по мере увеличения скорости ротора. При скорости ротора, близкой к скорости поля, возникает дополнительный момент, вызванный взаимодействием поля статора с намагниченным ферромагнитным сердечником ротора, и двигатель втягивается в синхронизм.

При отсутствии нагрузки на двигатель ось намагниченности ротора совпадает с осью полюсов статора. При появлении нагрузки на двигатель, произойдет затормаживание ротора и возникает между осями магнитных

полей угол рассогласования  $\theta$ . Согласно (8.12), это увеличивает врачающий момент, который обеспечивает дальнейшую синхронную работу двигателя.

## Глава девятая

### ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

#### 9.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Электротехнология - обширная область промышленного и сельскохозяйственного производства, где для достижения технологической цели того или иного процесса используются либо преобразование электрической энергии в тепловую (электротермия, электросварка), либо эффект переноса вещества электрическим током (электрохимия), либо «непосредственное» воздействие электрического тока, электрических или магнитных полей на объект технологической обработки (электроэррозионные методы обработки материалов, электрофильтрование взвесей, облучение материалов потоками заряженных частиц, электромагнитная обработка жидкостей и расплавленных металлов и т.д.). Последняя группа электротехнологических процессов условно может быть названа электрофизическими методами обработки вещества, и часть этих процессов относится к электронно-ионной технологии.

Область электротехники, изучающая использование электрических полей для обработки материалов и создания в них целесообразно направленных изменений, называется электронно-ионной технологией.

Часто материал подвергается воздействию электрического поля в виде отдельных частиц. Чтобы при электрическом воздействии на материал мог возникнуть технологический процесс, необходимо участие электрического поля достаточной напряженности, а также упорядоченного движения электрических зарядов и материала, в котором происходит технологический процесс. В частном случае электрическое поле и движущиеся заряды, воздействуя на материал, выполняют роль, подобную инструменту или рабочему органу, и способствуют перемещению материала в поле для его разделения (сепарации), смещивания, осаждения и т.п.

Во всех процессах электронно-ионной технологии электрическая энергия непосредственно воздействует на обрабатываемый материал. Исключается преобразование ее в другие виды энергии, как при обычном способе применения электроэнергии, в результате чего энергоемкость процесса резко снижается. Эта особенность позволяет ускорить производственные процессы и в ряде случаев может исключить непроизводительные, промежуточные операции.

Процессы электронно-ионной технологии, несмотря на сравнительно недавнее зарождение, получили довольно широкое производственное распространение. Электронно-ионная технология нашла эффективное применение в следующих областях: электроокраска, нанесение

порошковых покрытий в электрическом поле, электропечать, применение электрических полей в текстильной промышленности.

Одним из перспективных процессов электронно-ионной технологии является электрическая сепарация. Наиболее широкими областями применения электрической сепарации являются электрообеспыливание и разделение различных видов минерального сырья, также и зерновой смеси.

Электрическая сепарация минерального сырья используется в основном для двух целей: электрического обогащения и электрической классификации.

Электрическое обогащение - процесс разделения смесей минералов по их составу на основе различий в электрических свойствах разделяемых компонентов.

Электрическая классификация - процесс разделения частиц одного минерала или минералов, обладающих близкими электрическими свойствами, но отличающихся по крупности или по форме зерен.

Физические закономерности электрического обогащения и классификации имеют общие основы.

В истории развития электрической сепарации как процесса обогащения минерального сырья можно выделить несколько периодов.

Первый патент на способ электрической сепарации золота от кварца был зарегистрирован в 1881 г. Уже в 1900г. в США одновременно три фирмы начали освоение серийного выпуска электрических сепараторов. В 1908г. была пущена в эксплуатацию первая промышленная установка производительностью 20т/ч для обогащения и электросепарации.

В 1936 г. российские ученые Н.Ф. Олофинский, М.В. Бочиевский и П.М. Рывкин предложили электросепаратор, применение которого позволило резко интенсифицировать процесс зарядки частиц, и в результате значительно увеличивать производительность сепараторов по обогащению руды.

Исследования по использованию электрических полей для разделения продуктов размола зерна изложены в трудах С.А. Веселова и С.П. Жебровского. На возможность очистки и сортирования зерна в поле коронного разряда указывали Н.Ф. Олофинский и С.Ф. Кузькин.

С 1954 г. коллектив кафедры «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве» Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства (ЧИМЭСХ) работал над проблемой электронно-ионной технологии в сельском хозяйстве, в которую входили вопросы теории и использования электрических полей постоянного тока высокой напряженности для очистки, сортирования и предпосевной обработки зерна. С 1970 г. под руководством Ф.Я. Изакова проводились исследования по применению в сельском хозяйстве, в частности в птицеводстве, ионизации в помещении, электрических фильтров, электроаэрозольных генераторов или распылителей.

## 9.2. ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВ

### ЭЛЕКТРОННО-ИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Важнейшим элементом установки электронно-ионной технологии является высоковольтный источник постоянного тока.

Для получения оптимальных режимов работы различных устройств электронно-ионной технологии требуются источники с соответствующими значениями выходных напряжений.

Например, для электрофильтров, предназначенных для очистки газов, требуется напряжение 40-100 кВ, для электрозерноочистительных машин - 30÷80 кВ, а для питания электроаэрозольных генераторов - 1÷5 кВ и т.д. При этом источники напряжения должны обеспечивать плавное регулирование напряжения, стабильность выходных параметров при колебаниях напряжения сети и иметь защиту от перегрузок и короткого замыкания.

В качестве источников высокого напряжения могут применяться электростатические генераторы и высоковольтные выпрямительные устройства. Экономически наиболее выгодными считаются последние. На рис. 9.1 представлена простая двухполупериодная мостовая схема выпрямления.

Выпрямитель содержит четыре вентиля  $B_1, B_2, B_3, B_4$  и повышающий трансформатор  $Tr$ . Сетевое напряжение  $U_1$  с помощью трансформатора повышается до величины  $U_2$ , а с выпрямительного моста снимается напряжение  $U_0$ .

Наиболее громоздким аппаратом высоковольтных выпрямительных устройств является повышающий трансформатор, чем выше напряжение, тем труднее осуществить изоляцию обмоток, тем больше его габариты и меньше надежность.

Поэтому в выпрямительных устройствах нашли применение схемы умножения напряжения, позволяющие получать на выходе напряжение, значительно превышающее напряжение на вторичной обмотке трансформатора.

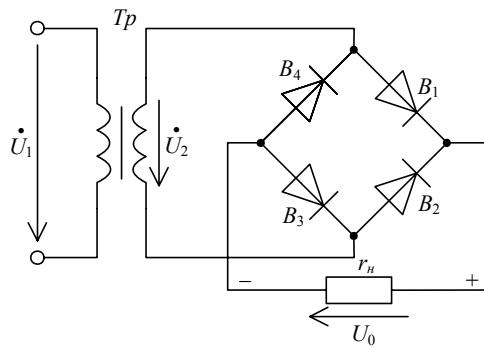


Рис. 9.1. Двухполупериодная мостовая схема выпрямления

Принцип действия таких выпрямителей основан на том, что на нагрузку разряжаются включенные в схеме конденсаторы, каждый из которых заряжен от выпрямителя до сравнительно небольших напряжений.

Схема умножения состоит из повторяющихся одинаковых элементов-каскадов. Напряжение на выходе схемы составляет  $2nU_{2m}$ , где  $n$  – число каскадов, а  $U_{2m}$  – амплитуда напряжений вторичной обмотки питающего трансформатора.

Чтобы представить работу одного каскада, рассмотрим схему удвоения напряжения (рис. 9.2 а). Пусть в первый полупериод на вторичной обмотке трансформатора в точке б полярность напряжения положительная, а в точке а – отрицательная. Тогда ток, протекающий через вентиль  $B_1$ , заряжает конденсатор  $C_1$  до амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_{2m}$ . Во второй полупериод, когда полярность напряжения  $U_2$  изменяется, напряжение на конденсаторе  $C_1$  и амплитуда напряжения вторичной обмотки суммируются, и через вентиль  $B_2$  конденсатор  $C_2$  заряжается до напряжения  $U_0 = 2U_{2m}$ .

Дальнейшее повышение напряжения может быть достигнуто за счет добавления каскадов умножения.

На рис. 9.2,б показана схема учетверения, а на рис. 9.2,в - ушестерения напряжения.

Дальнейшее снижение габаритов выпрямителей может быть осуществлено за счет повышения частоты питания. В первую очередь с увеличением частоты питания снижаются габариты и вес повышающего трансформатора, так как уменьшаются сечение сердечника магнитопровода и длина проводов обмотки. При достаточно высокой частоте повышающий трансформатор может быть изготовлен и без сердечника.

### 9.3. ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

В большинстве случаев промышленные газы содержат мелкие твердые или жидкые частицы, от которых они должны быть очищены. Источниками загрязнения воздушной среды являются различные области производственной деятельности: химическая, строительная, добывающая промышленности и энергетика.

В результате деятельности человека в атмосферу ежегодно выбрасывается (350-400)  $10^6$  т. пыли, а вследствие стихийных явлений (ураганов, землетрясений, извержений вулканов и т.д.) примерно в 10 раз больше. Эти выбросы постепенно становятся сопоставимыми. Пыль и другие выбросы в атмосферу распространены неравномерно. Запыленность воздуха в городах в 9-10 раз больше, чем в сельской местности. Например, запыленность воздуха над океаном составляет 500 пылинок в  $1\text{ см}^3$ , а в городе -10<sup>5</sup> пылинок в  $1\text{ см}^3$ .

Значительная доля загрязнения окружающей среды происходит от выбросов энергетических сооружений. В рамках бывшего СССР на тепловые электрические станции приходилось примерно 25% суммарных

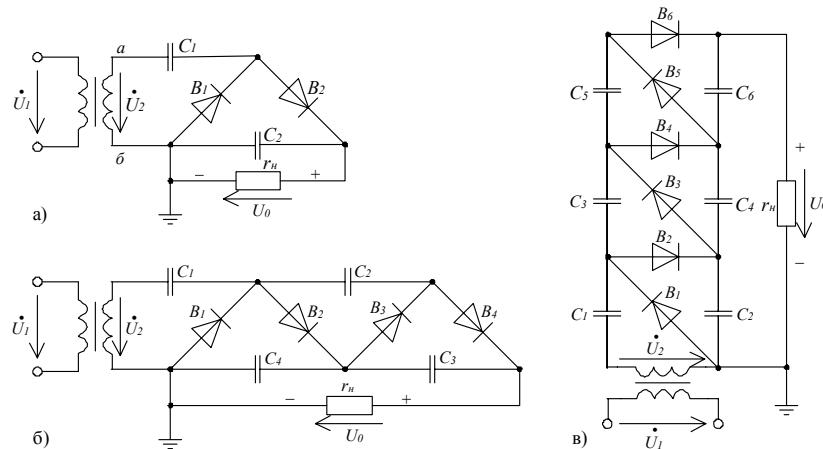


Рис. 9.2. Схемы умножения напряжения: (а) удвоения, (б) учетверения, (в) ушестерения

вредных выбросов промышленных предприятий страны (5,46 млн. т золы, 8,23 млн. т окислов серы и 2,6 млн. т оксидов азота). Для блока тепловой электрической станции мощностью 500 МВт объемный расход газов составляет примерно 500 м<sup>3</sup>/с при запыленности 20 г/м<sup>3</sup>, т.е. в воздух выбрасывается при отсутствии пылеулавливания 360 т золы в час.

Атмосферная пыль таит серьезную угрозу растительному и животному миру и является чрезвычайно вредным для здоровья человека.

В последние годы социальные задачи охраны среды приобрели в высокоразвитых странах приоритет перед получением прибыли. Стимулируются поиск и применение высокоэффективных и дешевых средств решения проблем защиты среды от загрязнения. Поиски эффективных способов пылеотделения привели к созданию электрического способа очистки газов.

Электрическая очистка газа - это процесс, при котором твердые или жидкие частицы удаляются из газообразной среды под воздействием электрических сил. Аппараты для очистки газов этим методом называются электрическими фильтрами.

В электрических фильтрах широко используется коронный разряд, представляющий собой мощный источник образования электрических зарядов.

При повышении напряжения между электродами до значения, при котором начинается интенсивная ионизация, возникает коронный разряд. Из двух электродов наиболее интенсивная ионизация происходит вблизи поверхности электрода с меньшим радиусом кривизны, где напряженность поля наибольшая. Обычно для получения коронного разряда в качестве коронирующих электродов применяются натянутый между изоляторами тонкий провод, электроды, снабженные иглами и остриями различных форм. Для образования коронного разряда необходимо, чтобы коронирующий электрод находился под высоким электрическим потенциалом, который получает от источника высокого напряжения.

Принцип электрической очистки газа заключается в следующем. При прохождении газа через поле коронного разряда частицы пыли заряжаются и под действием электрических сил осаждаются на поверхности так называемого осадительного электрода.

Электрофильтры независимо от назначения и типа состоят из следующих элементов: корпуса; коронирующих и осадительных электродов; узлов подвода, распределения и отвода очищаемых газов; узлов подвода высокого напряжения на электроды; устройств для удаления уловленной пыли с осадительного электрода.

Очищаемые газы пропускают через неоднородное электрическое поле, образующееся между коронирующим и осадительными электродами (рис.9.3).

Коронирующий электрод 2 изолирован от корпуса устройства или осадительного электрода 3 с помощью изоляторов 4 и к нему подводится потенциал отрицательной полярности от источника высокого напряжения 1 при величине напряжения 50-80 кВ. Осадительные электроды заземляются и подключаются к положительному полюсу. Преимущественное применение отрицательной короны связано с большей стабильностью и большой протяженностью рабочей области коронного разряда.

Процесс электрического улавливания частиц в электрофильтре можно разделить на три стадии: зарядку взвешенных частиц, движение заряженных частиц к электродам и осаждение на электродах. Зарядка в электрическом поле короны взвешенных в газе частиц происходит вследствие адсорбции ионов поверхностью взвешенных частиц.

В основном осаждение частиц происходит под действием электрического поля. Известно, что на частицу с зарядом  $q$ , находящуюся в электрическом поле напряженностью  $E$ , действует кулоновская сила

$$F = qE$$

Электрофильтры работают при напряженности поля, не превышающей 3-4 кВ/см. Осевшие на электродах частицы удаляются при помощи периодического встряхивания.

Конструкцию электрофильтров в основном определяют условия его работы: состав и свойства очищаемых газов и взвешенных частиц, требуемая степень очистки и т. п.

Электрофильтры разделяют на две группы: однозонные (рис. 9.4,а), в которых зарядка и осаждение частиц происходят в одной конструктивной зоне, где расположены коронирующие и осадительные электроды, и двухзонные (рис. 9.4,б), в которых зарядка и осаждение частиц происходят в различных зонах.

Большинство электрофильтров, используемых для очистки

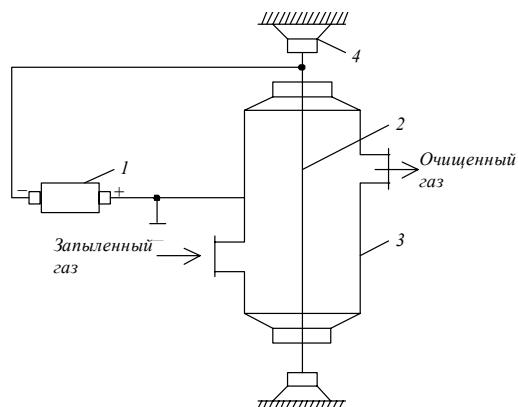


Рис. 9.3. Принципиальная электрическая схема

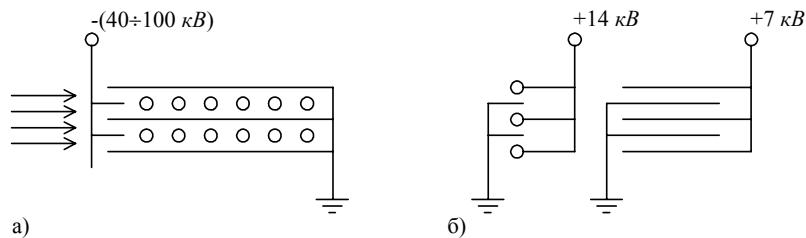


Рис. 9.4. Виды электрофильтров: (а) однозонный; (б) двухзонный

промышленных газов, – однозонные. Двухзонные электрофильтры применяются в основном для очистки вентиляционного воздуха.

#### 9.4. АЭРОИОНИЗАЦИЯ

В атмосфере земли, помимо нейтральных атомов и молекул, всегда содержатся ионы. Все ионы воздуха принято называть аэроионами. В природе аэроионы возникают в результате естественного радиоактивного излучения веществ, а также под влиянием космических лучей. Таким образом, между ионизированным слоем атмосферы и землей имеется электрическое поле. Для людей, животных и растений электрическое поле, заряженные частицы в виде аэроионов, являются естественными и неотъемлемыми факторами, влияющими на их жизнедеятельность и развитие.

Источниками ионизации местного значения являются атмосферные грозовые разряды, водопады, коронирование высоковольтных проводов и др.

Интенсивность естественной ионизации в атмосфере вблизи земли составляет 10 пар ионов в 1 см<sup>3</sup> в секунду, из них 58% вызваны радиоактивностью почвы, а 15% – космическими лучами. Заряженная молекула воздуха представляет собой легкий, значительно подвижный аэроион. Если ионизированная молекула воздуха осела на пылинку или частицу жидкости, то такой аэроион называется тяжелым.

В деревенском воздухе в 1 см<sup>3</sup> содержится до 800-1000 легких аэроионов. В чистом воздухе отсутствуют тяжелые аэроионы. В воздухе некоторых городов число легких аэроионов может упасть до 50-100, а число тяжелых аэроионов возрасти до нескольких тысяч в 1 см<sup>3</sup>. Тяжелые ионы, представляющие собой заряженную пыль, копоть, дым, разные испарения, оказывают отрицательное действие на живые организмы, а легкие отрицательные ионы оказывают благотворное и целебное действие.

Исследователи А.Л. Чижевский, М. Лапорт, Т. Мартин и др. считают, что легкие аэроионы отрицательной полярности в воздухе – это аэроионы кислорода воздуха.

Опыты на животных и птицах показали, что аэроионы отрицательной полярности при концентрации 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> в 1 см<sup>3</sup> воздуха при ежедневной

дозировке 30 мин. улучшают продуктивность. Благодаря отрицательным ионам, усиливаются окислительно-восстановительные процессы, увеличивается содержание гемоглобина в крови, повышаются защитные функции организма. Кроме биологического эффекта, ионизация создает и гигиенический эффект, заключающийся в очистке воздуха от пыли и микробов, уменьшении концентрации аммиака и углекислого газа. В помещениях сельскохозяйственных животных, птиц наблюдается существенный недостаток необходимых легких аэроионов, а в избыточной концентрации находятся тяжелые ионы, вызывающие неблагоприятные физиологические факторы.

Установлено, что при значительном недостатке отрицательных легких аэроионов животные скоро начинают слабеть, терять в весе, делаются вялыми, теряют аппетит и в некоторых случаях погибают.

Воздух закрытых помещений можно оздоровить при помощи аэроионизаторов, насыщающих его отрицательными аэроионами. Первым коронноразрядным ионизатором явилась так называемая «люстра» А.Л. Чижевского, представляющая собой изоляционную плиту площадью  $1\text{m}^2$ , в которую вмонтировано 400 острый длиной 5 см, расположенных на расстоянии 5 см друг от друга. К электродам - остриям подводится напряжение 50÷80 кВ. Ток, потребляемый таким ионизатором, менее 1mA при генерировании  $10^{10}$  ионов в секунду. Ввиду громоздкости и неравномерности распределения ионов эти «люстры» были вытеснены простыми в изготовлении проволочными коронирующими электродами, обеспечивающими равномерное насыщение ионами воздушного объема помещения.

Принципиальная схема аэроионизационной установки, внедренной в птичниках, представлена на рис. 9.5.

Сетевое напряжение, регулируемое автотрансформатором  $AT$ , подается на повышающий трансформатор  $Tp$  и выпрямляется высоковольтными диодами  $D1...D4$  по мостовой схеме. Выпрямленное напряжение через гасящие резисторы  $R1...R7$  подается на коронирующие электроды. Эти резисторы защищают персонал от поражения электрическим током, снижая ток короткого замыкания в случае прикосновения к коронирующей системе. Подбором сопротивления резисторов можно обеспечить одинаковую концентрацию ионов в помещении. В качестве гасящих применяют высоковольтные резисторы КЭВ сопротивлением от одного до нескольких ГОм ( $1\text{GOm} - 10^9\text{ Oм}$ ).

Источником высокого напряжения служат преобразователи типа ПВС-40 – 6 (40 кВ, 6 мА). Общая продолжительность двух сеансов от 0,5 до 8

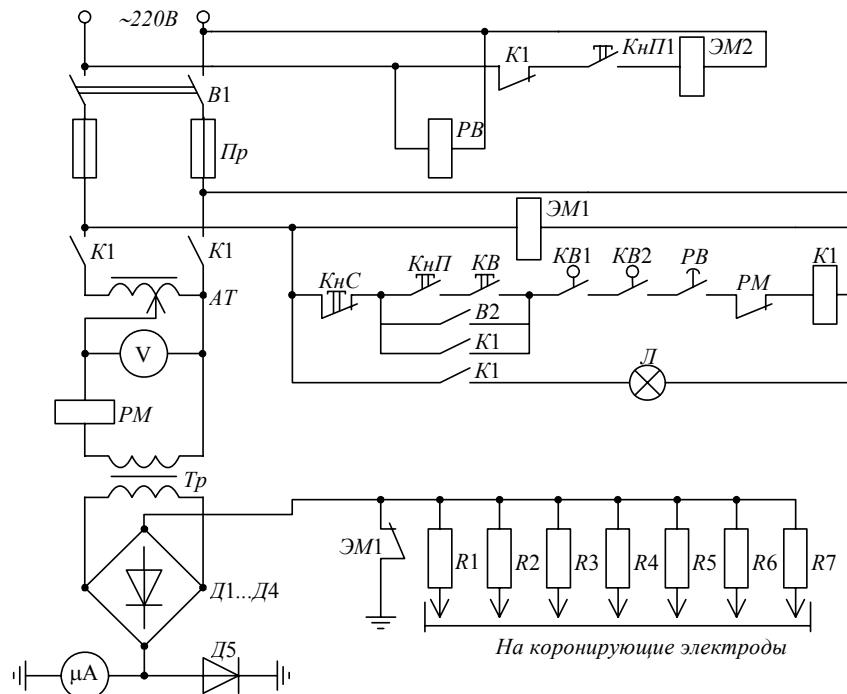


Рис. 9.5. Принципиальная схема аэроионизационной установки:  $B1, B2$  - выключатели;  $Pr$  - предохранители;  $K1$  - магнитный пускатель;  $KнП$  и  $KнС$  - кнопки «пуск» и «стоп»;  $ЭМ1$  и  $ЭМ2$  - электромагниты разрядника и электрического замка;  $KнП1$  - кнопка замка;  $PM$  - максимальное токовое реле;  $KB1$  и  $KB2$  - конечные выключатели дверной блокировки;  $V$  - вольтметр;  $μA$  - микроамперметр;  $D5$  - диод для защиты амперметра;  $L$  - сигнальная лампа;  $D1...D4$  - диодные столбики высоковольтного выпрямителя

часов в сутки, причем, периоды ионизации чередуются с периодами отдыха.

Установку желательно включать в нерабочее время, используя программное управление от реле времени *PB*.

Для обеспечения безопасности применяют еще блокировки дверей, электрические замки, реле безопасности, которые срабатывают при появлении тока короткого замыкания, вызванного прикосновением человека к электродам.

В результате аэроионизации яйценоскость кур увеличивается на 3...10%, причем большие цифры относятся к худшему зоотехническому фону. Оптимальная концентрация ионов равна 250 тыс/см<sup>3</sup>, хотя значительный эффект сохраняется в диапазоне 100...500 тыс/см<sup>3</sup>. Одновременно на 20...30% снижается концентрация пыли и микробов.

В зарубежной практике аэроионизаторы применяются для снижения утомляемости рабочих предприятий, летчиков и даже шоферов.

В нашей стране имеются опыты успешного использования ионизаторов. А.Л.Чижевский для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных рекомендует концентрацию  $10^3 - 10^4$  ионов в 1см<sup>3</sup>, три сеанса в день с продолжительностью по 15 мин на протяжении 80 – 90 дней. Для терапевтической ионизации соответственно концентрации  $10^4 - 10^6$  ионов в 1см<sup>3</sup>, 2 – 3 сеанса в день по 15 мин на протяжении 20 – 30 дней.

В результате аэроионизации в животноводстве отмечались также положительные явления, как повышение суточного удоя коров на 0,34-0,59 кг, жирности молока на 0,1%, повышение суточных привесов поросят на 14...19%.

Также изучено воздействие искусственных аэроионов на растения. Опыты по аэроионизации томатов в теплицах при отрицательной короне дали прибавку урожая на 13%. В качестве ионизатора использовалась неизолированная никромовая проволока диаметром 0,25 мм, подвешенная на изоляторах на высоте 1,5 м над поверхностью почвы гряд. На проволоку подавалось напряжение 25 и 37 кВ от высоковольтной выпрямительной установки. Продолжительность воздействия была принята 5 и 15 мин по 2 раза в сутки. Расход электрической энергии на аэроионизацию очень мал, поэтому затраты практически определяются стоимостью ионизаторов и ухода за ними.

#### 9.5. ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЬНЫЕ РАСПЫЛИТЕЛИ

Аэрозольная технология нанесения химических и биологических препаратов на объекты широко используется в различных областях сельского хозяйства, медицины и промышленности. Одновременная массовая профилактическая или лечебная обработка животных и птиц доступна только при аэрозольном методе. Использование аэрозольного метода при защите растений от вредителей и болезней, также при

дезинфекции помещений позволяет резко сократить норму расхода химических препаратов на единицу площади.

Однако существующий аэрозольный метод нанесения химикатов на обрабатываемый объект имеет ряд существенных недостатков, главные из которых:

- низкое качество обработки объектов;
- значительные потери химиката.

Практически химикат не попадает на нижние поверхности листьев растений при их обработке от вредителей и болезней.

При дезинфекции помещений основная масса аэрозоля остается на полу, а потолок остается почти необработанным. Плохое осаждение аэрозоля и снос его ветром при обработке растений, кроме прямого материального ущерба, представляют опасность загрязнения окружающей среды.

Установлено, что при аэрозольной обработке растений на них осаждается только 20 – 30% распыленного раствора пестицида.

Одним из путей существенного улучшения качества аэрозольной обработки и осаждения химиката является применение электрически заряженных аэрозолей. Под действием электрического поля заряженные частицы направляются к различным поверхностям обрабатываемого объекта и осаждаются на них ровным слоем.

Для обработки растений электрозваряженными аэрозолями с большим эффектом можно использовать конструкцию дискового электростатического распылителя, принципиальная схема которого дана на рис. 9.6.

Распыливающий диск, вращающийся от коллекторного электродвигателя частотой 8000 об/мин, изолирован от прочих частей конструкции с помощью изоляционной вставки 2, благодаря чему, становится возможным соединение диска 1 с потенциальным выводом источника постоянного тока 3. Раствор, подаваемый к центру вращающегося диска, находящегося под электрическим потенциалом, растекается тонким слоем и срывается с его края отдельными частицами, получившими контактную зарядку. При этом знак заряда частиц определяется знаком потенциала диска. Над краем диска имеется кольцевой заземленный электрод 6.

Между факелом заряженного аэрозоля 4, диском 1, с одной стороны, и обрабатываемыми растениями 5, с другой, создается электрическое поле, под действием которого заряженные частицы движутся к объекту по силовым линиям этого поля. Вследствие того, что часть этих линий замыкаются на нижнюю сторону листьев, интенсивное осаждение аэрозольных частиц происходит и там. Это очень важно для защиты растений от насекомых-вредителей, так как в основном они гнездятся на нижней стороне листьев.

На рис. 9.7 представлены микрофотоснимки нижней поверхности

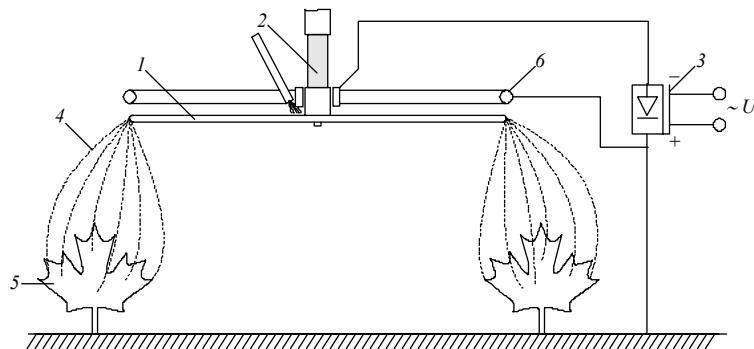


Рис. 9.6. Схема работы дискового электростатического распылителя при обработке растений

образца листьев растений после обработки: а) заряженными аэрозолями при напряженности поля зарядки 2 кВ/см; б) незаряженными аэрозолями.

Такое резкое увеличение осаждения на нижнюю поверхность листьев растений показывает возможность существенного сокращения нормы расхода рабочего раствора без ущерба на качество обработки и соответствующего снижения угрозы загрязнения окружающей среды.

этот распылитель обеспечивает удельный заряд жидкости до 43 мкКл/мл при расходе 45 мл /мин и напряженности поля в 7,2 кВ/см. Дисперсный состав электроаэрозоля при этом режиме содержит частицы диаметром 20-60 мкМ.

При обработке помещений дезинфицирующими растворами незаряженных аэрозолей на стены осаждается только 5-12 % препарата, а на потолок и того меньше  $0,005\div0,05$  %. В результате зарядки появляются электрические силы, действующие на аэрозольные частицы. Эти силы соизмеримы с силой тяжести, что создает возможность ее преодоления и оседания частиц на потолке и стенах.

Электростатический распылитель для проведения аэрозольного метода обработок в ветеринарии показан на рис. 9.8.

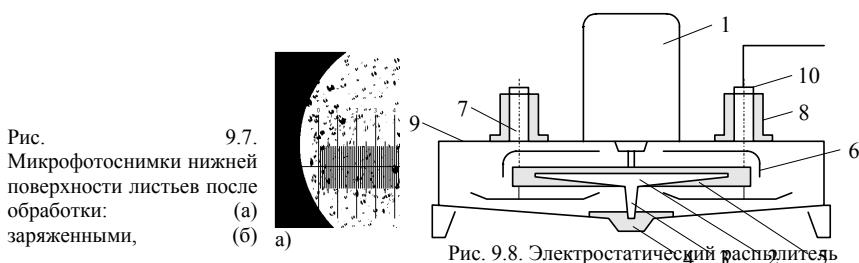


Рис. 9.7.  
Микрофотоснимки нижней поверхности листьев после обработки:  
заряженными, (а)  
(б)

243

Распылитель имеет электродвигатель 1, на валу которого жестко закреплен заземленный диск 2, снабженный конусом 3 для подачи рабочей жидкости на диск из резервуара 4. Вокруг диска размещен кольцевой электрод в виде турбулизирующей сетки 5, которая совместно с отражателями 6 жестко прикреплена металлическими штырями 7 к изоляторам 8 крышки корпуса 9. Через клемму 10 сетка и отражатели соединены с отрицательным полюсом источника тока.

Принцип действия заключается в следующем. При вращении диска частотой 8000 об/мин. за счет вентиляционного эффекта создается разряжение, распространяющееся в нижнюю часть заборного конуса. Благодаря этому разряжению и центробежной силе жидкость из рабочего резервуара поднимается на поверхность диска. Растекаясь пленкой, жидкость срывается с кромки диска и попадает на сетку с подведенным потенциалом. Дробясь на сетке и заряжаясь, жидкость в виде монодисперсных капель вылетает через зазор отражателей в окружающее пространство.

Применение электрода в виде турбулизирующей сетки дает возможность повысить дисперсность аэрозоля и получить размеры капель в пределах 1-5 мкм, которые необходимы для ингаляционного способа вакцинации и лечения. Важно отметить, что заряженные капли лекарств и вакцины проникают в глубокие дыхательные пути, лучше осаждаются в легких и поэтому более эффективно усваиваются организмом животных и птиц.

Ввиду малой мощности (до 15 мл/мин) этот распылитель используется в относительно малых объемах.

Применение этого распылителя при электроаэрозольной дезинфекции позволило существенно улучшить равномерность обработки поверхности помещения и снизить потери. Отмечено, что попадание раствора на потолок увеличивается в 300 раз, а на стены - в 2 раза, осаждение на пол уменьшается в 1,5 раза в сравнении с дезинфекцией обычными аэрозолями без зарядки.

С повышением мощности по расходу жидкости уменьшается удельный заряд аэрозоля и эффект от электризации аэрозоля снижается.

Экспериментальные исследования более мощного распылителя показали, что при расходе жидкости 300 мл/мин и напряжении 3-7 кВ можно получить удельный заряд порядка 2-3 мКл/мл.

Такая степень электризации достаточно хорошо обеспечивает равномерность распределения аэрозольных частиц размерами 10-12 мкм в обрабатываемом помещении.

#### 9.6 ЭЛЕКТРООКРАСКА

Электроокраска изделий является одним из технологических процессов, при котором применение электрического поля оказалось весьма эффективным.

Обычный способ окраски изделий производится в большинстве случаев путем пневматического распыления жидкой краски и переноса капель к изделию потоком воздуха из распылителя. Основным недостатком такого метода является большая (около 50%) потеря краски, которая не попадает на изделие.

Метод электроокраски заключается в использовании электрического поля при нанесении лакокрасочного материала на изделие.

Процесс электроокраски можно разделить на два этапа. На первом этапе жидкость проходит через распыливающе-зарядный узел устройства и в результате частицы краски получают электрический заряд. Второй этап связан с переносом заряженных частиц под действием электрических сил к изделию. При этом частицы краски, двигаясь по траекториям, близким к силовым линиям электрического поля, практически все оседают на окрашиваемом изделии. Потери краски не превышают 10-20%.

Помимо уменьшения потерь электроокраска обеспечивает существенное улучшение качества покрытия. Заряженный слой краски прижимается электростатическими силами к изделию, и покрытие получается плотным и ровным.

Процесс распыления жидкости, в принципе, можно осуществить под действием силы электрического поля большой напряженности.

Установлено, что образующаяся на выходе из распылителя капля растет до тех пор, пока действующие на нее электрические силы не превысят силы поверхностного натяжения. Если преобладают электрические силы над силами поверхностного натяжения, то наблюдается нарушение устойчивости поверхности капли, и она дробится на мелкие частицы. Такой процесс называется электростатическим распылением жидкости. На практике электроокраски этот метод распыления находит ограниченное применение из-за малой производительности по расходу жидкости и необходимости использования больших напряжений.

Наибольшее распространение получили электромеханические распылители. Механическое распыление в сочетании с последующей зарядкой и транспортировкой частиц в электрическом поле составляет основное направление в электроокраске. В данном случае электрические силы могут принимать лишь частичное участие в распылении жидкости.

Существуют следующие способы механического распыления жидкости: пневматические, центробежные, гидравлические. Для распыления краски в основном применяются пневматические и центробежные способы. Центробежное распыление происходит на кромке

диска, вращающегося с большой скоростью (около 40 тыс. об/мин), в результате действия центробежных сил на пленку краски.

Пневматическое распыление производится с помощью сжатого воздуха. Размер капель тем меньше, чем больше относительная скорость воздуха.

Сочетание различных способов зарядки и дисперсирования жидкости создает многообразие в конструкциях электромеханических распылителей. В целом ряде конструкций зарядка частиц распыленной жидкости производится от коронирующих электродов, расположенных вокруг распылителя.

Наряду с зарядкой частиц, в поле коронного разряда используется зарядка жидкости в электростатическом поле за счет контактного или индукционного способов электризации.

При контактном способе зарядки слой распыляемой жидкости непосредственно касается потенциального электрода, то есть электрода, соединенного с выводом источника высокого напряжения. Например, этот случай имеет место, когда вращающийся диск или чаша, распыливающие жидкость, находятся под высоким потенциалом.

Широкое применение находит пневматический распылитель с индукционной зарядкой жидкости. Принципиальная схема такого распылителя показана на рис. 9.9.

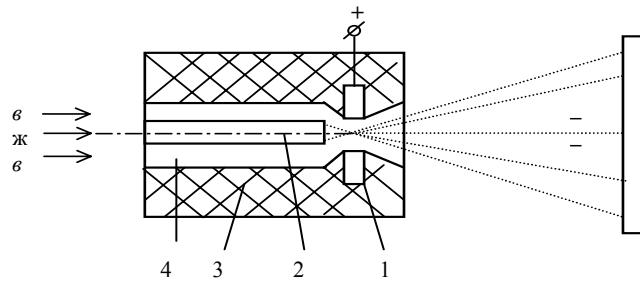


Рис. 9.9. Принципиальная схема пневматического распылителя с индукционной зарядкой жидкости.

Распылитель состоит из кольцевого электрода 1, сопла для подачи жидкости 2, изоляционного корпуса 3, образующего воздушное сопло 4.

Если на кольцевой электрод подается потенциал от источника постоянного напряжения, а сопло для подачи жидкости заземляется, то на поверхности цилиндрического слоя жидкости индуцируются заряды, в результате чего частицы распыленной жидкости оказываются заряженными. Заряженные частицы в потоке воздуха направляются в сторону поверхности, подлежащей покрытию. Расход воздуха при

давлении  $3 \cdot 10^5$  Па составляет 2,5 л/с. Расход жидкости изменяется до 6 г/с. Напряжение между осевым наконечником и индуцирующим кольцевым электродом составляет 600–800 в.

### 9.7 ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Обработка металлов импульсами электрического тока называется электроэрозионной или электроискровой обработкой.

Электроэрозионный метод обработки металлов был открыт в 1943 году инженерами Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.

Под электроэрозионной обработкой понимают обработку металлов с использованием электрической эрозии (разрушения), возникающей при создании импульсного разряда между обрабатываемой деталью и специальным электродом-инструментом. Длительность серии разрядов, имеющих весьма кратковременный импульсный характер, составляет  $10^{-2} - 10^{-6}$  с. Каждый такой искровой импульс вызывает местное разрушение в виде углубления - лунки.

Для уяснения принципа работы электроэрозионной установки рассмотрим электрическую схему (рис. 9.10) с генератором импульсов. Схема состоит из источника постоянного тока Е, токоограничивающего сопротивления R, накопителя - конденсатора С, электрода - инструмента И, электрода - обрабатываемой детали Д.

Межэлектродный промежуток обычно заполняется диэлектрической жидкостью.

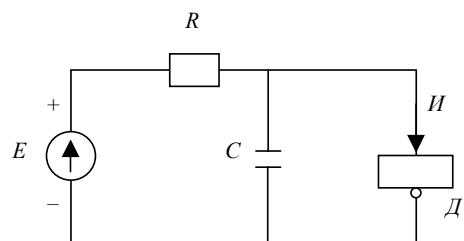


Рис. 9.10. Схема электроэрозионной установки с генератором RC

В качестве диэлектрической жидкости чаще всего используют керосин, дизельное топливо, соляровое масло, трансформаторное масло и другие минеральные масла.

При включении схемы к источнику постоянного напряжения конденсатор заряжается до напряжения источника питания в течении времени, пропорционального емкости конденсатора С и сопротивлению R.

Для получения искровых импульсных разрядов между электродами устанавливают такой промежуток, чтобы он пробивался напряжением  $U_p$ ,

меньшим, чем напряжение источника питания. Запасенная конденсатором

$\frac{CU_p^2}{2}$  энергия отдается при разряде кратковременным импульсом тока.

Вместе с тем действие разряда распространяется на очень малую площадь и вследствие чего выделяется значительное количество тепла, что вызывает взрывообразное плавление металла в месте касания искры, каким бы тугоплавким он ни был.

Одновременно с воздействием высокой температуры на металл происходят испарение и разложение окружающей электроды жидкости. Образовавшиеся пары и газы вызывают в зоне разряда достаточно высокое давление, способствующее вытеснению расплавившегося металла из кратера.

Пробивное напряжение рабочих жидкостей относительно высоко, но установки для электроэррозионной обработки обычно работают при напряжениях 200–300 В. Такие напряжения оказываются достаточными, ввиду того, что зазор между электродами очень мал (доли миллиметра). Этот зазор увеличивается по мере того, что с обоих электродов постепенно снимаются все новые порции металла. Поэтому электроды по мере их срабатывания необходимо сближать. Для поддержания неизменным такого зазора станки для электроэррозионной обработки, как правило, оснащены автоматическими регуляторами.

Эрозия электрода – инструмента крайне нежелательна как из экономических соображений, так и ввиду того, что форме инструмента придают обычно обратный характер по сравнению с желаемой формой изделия.

Обычно электроды-инструменты выполняются из латуни, меди, алюминия; их эрозия оказывается намного меньшей, чем эрозия сталей или твердых сплавов.

Наибольший эффект эрозии получается при определенном соотношении энергии и длительности импульса. Чем меньше длительность импульса при одной и той же энергии, тем выше температура и интенсивность расплавления и испарения металла и тем меньшая доля затраченной энергии распространяется в глубь металла, тем выше КПД процесса.

**Технология и области применения электроэррозионной обработки.** Электроэррозионную обработку применяют главным образом для изменения формы изделий из твердых сплавов, которые трудно обрабатываются на механических станках. Кроме того, существуют ряд таких операций, кото-

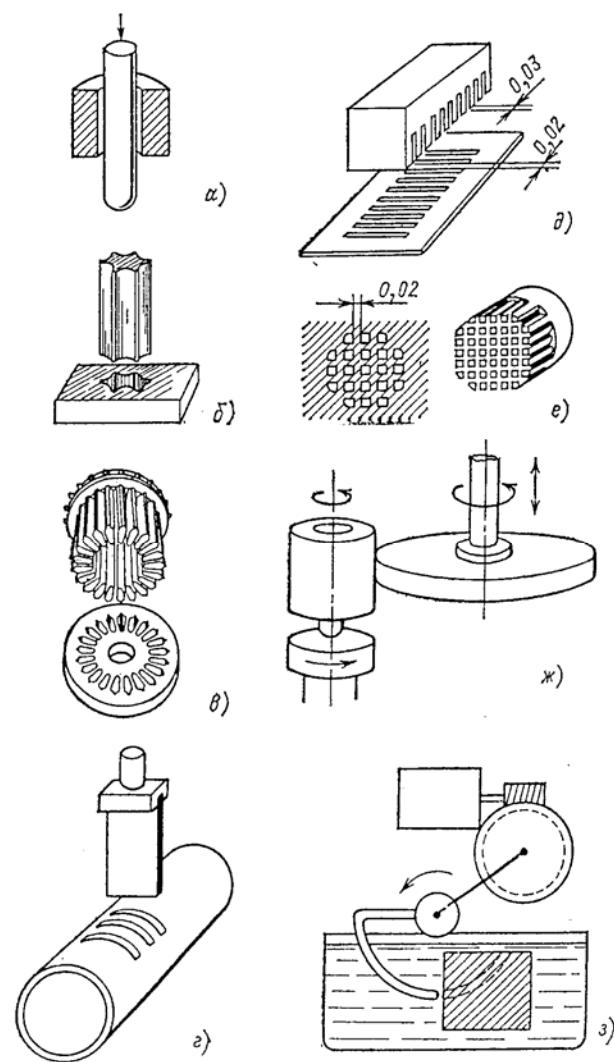


Рис. 9.11. Технологические операции при электроэрозионной обработке

рые вообще невозможно осуществить механическим способом, например прошивание мелких или криволинейных отверстий в металле, изготовление фасонных плоскостей, вырезание деталей сложного профиля.

Отсутствие силового воздействия между инструментом и заготовкой является основным преимуществом электроэрозионной обработки, позволяющим обрабатывать весьма твердые материалы.

Точность формы получаемых деталей зависит в основном от точности изготовления электрода-инструмента.

Наибольшее распространение получил способ использования электроэрозии для копировально-прошивочных операций. На рис. 9.11 приведены примеры некоторых характерных операций, осуществляемых с помощью электроэрозионной обработки. На рис. 9.11, а и б показано прошивание круглых или сложного профиля отверстий с помощью сплошного электрода-инструмента, а на рис. 9.11, в – одновременное прошивание нескольких отверстий сложного профиля сборным многоэлектродным инструментом. Такого рода операции осуществляются при изготовлении матриц штампов, обработке полостей пресс-форм, изготовлении трафаретов.

На рис. 9.11, г–е показано прошивание узких щелей, а также прошивание мелких сеток. При этом наименьшая ширина щели при ее глубине до 1 мм составляет 0,05 мм.

На рис. 9.11, ж показано профилирование изделий, а на рис. 9.11, з – получение криволинейных отверстий в металле

#### 9.8. ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Большая часть ископаемых добывается в виде руды, содержащей относительно небольшое количество полезного продукта. Прежде, чем поступить в переплавку, руда должна пройти обогащение с тем, чтобы повысить содержание полезных составляющих.

В некоторых производствах полидисперсный порошок, который обычно получается при дроблении, необходимо разделить на ряд фракций по размеру частиц. Такие требования выдвигаются, например, в электроугольном производстве при получении пьезокерамики, алмазных порошков и т.п.

Традиционный способ сортировки и очистки семян зерновых культур, основанный на различии частиц по их физико-механическим свойствам, недостаточно эффективен и трудоемок.

Наиболее эффективным способом разделения сыпучих материалов является сепарация их в электрическом поле.

Принцип действия электрических сепараторов основан на различии электрических свойств частиц, составляющих сыпучую смесь.

В зависимости от того, какое из электрических свойств используется для разделения смесей, различают несколько методов электрической сепарации.

**Сепарацию по электрической проводимости** применяют для разделения сыпучих материалов, частицы которых различаются по значению и характеру проводимости.

Процесс заключается в создании на основе различий в проводимости, отличающихся по значению или знаку электрических разрядов на частицах сыпучих компонентов смеси с последующим пропусканием их через электрическое поле достаточно высокой напряженности (не менее 3–4 кВ/см).

Разделение происходит путем отклонения под действием электрических сил траектории движения заряженных частиц в соответствии со значением и знаком заряда от траектории, характерной для движения незаряженных частиц в отсутствие электрического поля.

Для разделения минералов с низкой электропроводностью применяют **трибоэлектрическую сепарацию**. Этот метод основан на использовании трибоэлектрического эффекта, т. е. способности частиц минералов приобретать электрический заряд в процессе трения.

**Дизелектрическая сепарация** основана на различии в дизелектрической проницаемости разделяемых частиц и в получении ими разных величин заряда, например, в поле коронного разряда. Этот вид сепарации находит эффективное применение для отделения семян зерновых культур от семян сорных растений.

Целый ряд семян сорняков близки по своим физико-механическим свойствам с семенами зерновых культур. В этом случае традиционный способ сортировки, основанный на различии физико-механических свойств компонентов не обеспечивает качественной очистки семян. Например, трудно отделить овес от овсянки механическими методами. Между тем относительная дизелектрическая проницаемость овсянки в два с лишним раза больше, чем у овса, а это является условием успешного разделения их с помощью электросепарации.

Одним из основных факторов, от которого зависит процесс электросепарации, является принцип электрической зарядки частиц сыпучего материала. Наибольшее применение нашли способы зарядки частиц в электростатическом и коронном полях высоких напряжений.

Контактная электризация происходит при соприкосновении частицы материала с поверхностью электрода, находящегося под определенным электрическим потенциалом. Разновидностью подобной зарядки является индукционный способ электризации, когда проводящая частица касается заземленного электрода.

Широко применяется ионизационная зарядка частиц в поле коронного разряда.

Под влиянием электрического поля поток газообразных ионов движется от коронирующего электрода к заземленному. Частицы, находящиеся в межэлектродном промежутке, за счет осаждения на них ионов приобретают заряд одноименный с потенциалом коронирующего электрода.

Электрические сепараторы по конструкции делятся на барабанные и камерные.

Коронное поле используется на любой из этих конструкций, а электростатическое поле находит применение для зарядки частиц на барабанных сепараторах.

Электростатический барабанный сепаратор с контактной зарядкой частиц изображен на рис. 9.12, а.

Исходный сыпучий материал из бункера 1 подается на поверхность вращающегося барабана 2, соединенного с потенциальным полюсом источника высокого напряжения ВН.

Электропроводные частицы, касаясь барабана, получают одноименный с ним заряд, отталкиваются от поверхности барабана и попадают в отсек 3.

Неэлектропроводные попадают без отклонений по траектории, определяемой механическими силами, действующими на частицы, и собираются в отсеке 4.

Сепараторы этого типа малоперспективны, так как пригодны для узкоклассифицированного материала со значительной разницей в проводимости частиц.

Более эффективным аппаратом является барабанный электростатический сепаратор, изображенный на рис. 9.12, б. В таких сепараторах барабан 1 обычно заземляют для безопасности и удобства, а на отклоняющий электрод 2 подают высокое напряжение. Между электродами

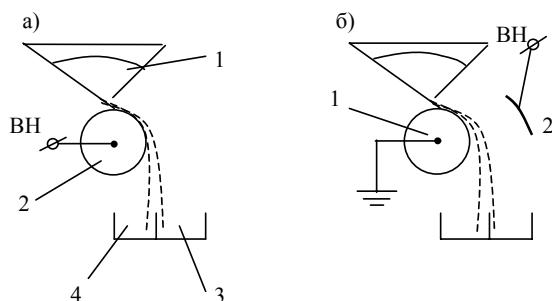


Рис. 9.12. Барабанные электростатические сепараторы: а - с контактной зарядкой; б - с индукционной зарядкой

образуется электрическое поле, проводящие частицы под действием явления индукции получают заряд, противоположной полярности, чем электрод 2. В результате этого электрическое поле способствует выделению проводящих частиц.

В электрокоронном сепараторе фактор, определяющий сепарацию, является сложной функцией, учитывающей одновременно удельный вес, диэлектрическую проницаемость, проводимость, размеры и форму частиц.

На рис. 9.13 представлена принципиальная схема коронного камерного сепаратора.

Частица падает под действием силы тяжести в промежутке между коронирующим 1 и осадительным 2 электродами. На начальном участке движения она заряжается и под действием электрического поля получает горизонтальную составляющую скорости.

В результате движения в горизонтальном направлении под действием электрического поля и в вертикальном под действием силы тяжести частица достигает осадительного электрода. Причем место осаждения зависит от фактора, определяемого физическими и электрическими свойствами частицы.

Камерные электросепараторы широко используются для разделения сыпучих материалов по размеру частиц. По высоте осадительного электрода частицы распределяются следующим образом: в верхней части будут находиться самые мелкие частицы, а в нижней - самые крупные. Разделав осадительный электрод на секции, получают ряд фракций, различающихся по размеру.

Также коронные камерные сепараторы применяются для разделения зерновой смеси по отличию их диэлектрической проницаемости.

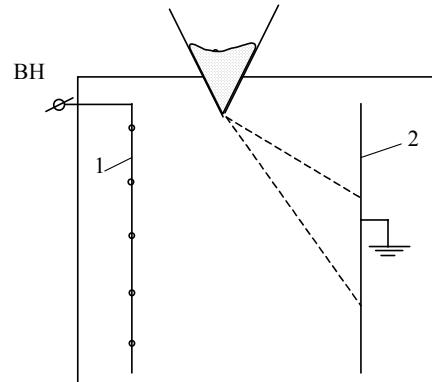


Рис. 9.13. Схема коронного камерного сепаратора

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров К.К., Кузьмина Е.Г.. Электротехнические чертежи и схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
2. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
3. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. – М.: Энергия, 1974. – 476 с.
4. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. ГОСТ 1494-77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. – М.: Изд-во стандартов, 1978.
6. ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения.
7. Евсюков А.А. Электротехника: Учеб. пособие для студентов физ. факультетов пед. ин-тов. – М.: Просвещение, 1979.
8. Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника. – М.: Высшая школа, 1984. – 375 с.
9. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 440 с.
10. Общая электротехника / Под ред. А.Т. Блажкина. – Л.: Энергия, 1979. – 470 с.
11. Общая электротехника /Под ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высшая школа, 1970. – 567 с.
12. Физические основы электрической сепарации /Под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1983. – 265 с.
13. Электрические измерения /Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 415 с.
14. Электротехника /Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.
15. Электротехнический справочник. В 3-х томах. /Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) М.: Энергоатомиздат, 1986. – Т. 2.
16. Электротехнологические промышленные установки /Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 399 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	4
<b>Глава первая. Электрические цепи синусоидального переменного тока .....</b>	<b>7</b>
1.1. Основные понятия и определения.....	7
1.2. Получение синусоидального тока .....	8
1.3. Основные параметры, характеризующие синусоидальные электрические величины .....	10
1.4. Действующие значения переменного тока.....	12
1.5. Среднее значение переменного тока.....	13
1.6. Векторное изображение синусоидальных электрических величин.....	14
1.7. Векторные диаграммы.....	15
1.8. Классификация электрических цепей синусоидального тока.....	17
1.9. Цепь с активным сопротивлением .....	17
1.10. Цепь с индуктивностью.....	19
1.10.1. Идеальная катушка. Ток, напряжение, индуктивное сопротивление .....	19
1.10.2. Реальная катушка. Треугольники напряжений и сопротивлений, полное сопротивление .....	23
1.11. Цепь с емкостью .....	26
1.12. Цепь при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений .....	28
1.13. Резонанс напряжений .....	30
1.14. Электрическая цепь с параллельным соединением сопротивлений .....	33
1.14.1. Метод векторных диаграмм.....	34
1.14.2. Метод проводимостей .....	35
1.15. Мощность цепи синусоидального тока.....	38
1.16. Комплексный метод.....	44
1.17. Резонанс токов .....	48
1.18. Технико-экономическое значение повышения коэффициента мощности .....	50

<b>Глава вторая. Электрические цепи трехфазного синусоидального тока.....</b>	<b>54</b>
2.1. Понятие о трехфазной системе электрических цепей и общие сведения .....	54
2.2. Элементы трехфазных цепей. Получение трехфазной системы ЭДС и способы их задания .....	55
2.3. Способы соединения трехфазной системы.....	56
2.3.1. Соединение в звезду .....	57
2.3.2. Соединение треугольником.....	61
2.4. Понятие о симметричности нагрузки и расчет трехфазной цепи.....	63
2.5. Мощность трехфазной системы .....	67
2.5.1. Измерение активной мощности трехфазной системы .....	68
<b>Глава третья. Катушка со стальным сердечником в цепи переменного тока .....</b>	<b>72</b>
3.1. Переменный магнитный поток в катушке со стальным сердечником. Уравнение трансформаторной ЭДС .....	72
3.2. Ток катушки со стальным сердечником .....	73
3.3. Реальная катушка, ее уравнение электрического состояния, векторная диаграмма и схема замещения.....	75
3.4. Потери в стальном сердечнике при переменном намагничивании .....	79
<b>Глава четвертая. Трансформаторы .....</b>	<b>81</b>
4.1.Общие сведения .....	81
4.2. Устройство и принцип действия трансформатора.....	81
4.3. Режим холостого хода трансформатора.....	83
4.4. Режим короткого замыкания трансформатора.....	86
4.5. Режим нагрузки трансформатора .....	87
4.6. Коэффициент полезного действия трансформатора.....	91
4.7. Внешняя характеристика трансформатора .....	92
4.8. Трехфазные трансформаторы .....	93
4.8.1.Форма сердечника. Способы соединения обмоток.....	93
4.8.2. Устройство и охлаждение трехфазного трансформатора .....	96
4.9. Параллельная работа трансформаторов.....	97
4.10. Измерительные трансформаторы .....	98
4.11. Сварочные трансформаторы .....	101
4.12. Автотрансформаторы .....	103

<b>Глава пятая. Электрические измерения и электроизмерительные приборы.....</b>	106
5.1. Общие сведения и классификация	
электроизмерительных приборов .....	106
5.2 Общее в конструкции приборов .....	107
5.3. Номинальные величины и постоянные приборов.....	108
5.4. Чувствительность и класс точности приборов.....	109
5.5. Системы электроизмерительных приборов	
непосредственной оценки .....	110
5.6. Магнитоэлектрическая система.....	110
5.7. Электромагнитная система .....	115
5.8. Электродинамическая система .....	118
5.9. Индукционная система .....	121
5.10. Электростатическая система.....	125
5.11. Логометры .....	126
5.12. Условные обозначения электроизмерительных	
приборов .....	127
5.13. Методы электрических измерений .....	130
5.13.1. Измерение сопротивлений.....	130
5.13.2. Измерение емкости и индуктивности .....	133
5.14. Сведения об измерениях неэлектрических величин .....	136

<b>Глава шестая. Электрические машины постоянного тока .....</b>	139
6.1. Общие сведения и область применения машин	
постоянного тока.....	139
6.2. Устройство и принцип действия машин постоянного	
тока.....	140
6.2.1. Принцип действия генератора .....	140
6.2.2. Принцип действия двигателя .....	143
6.2.3. Устройство машины постоянного тока.....	144
6.3. ЭДС якоря.....	145
6.4. Электромагнитный момент машины постоянного тока .....	148
6.5. Типы обмоток якоря .....	149
6.6. Реакция якоря .....	150
6.7. Коммутация .....	152
6.8. Генераторы постоянного тока и их классификация.....	153
6.8.1. Характеристики генераторов .....	154
6.8.2. Генераторы независимого возбуждения .....	154
6.8.3. Генераторы с самовозбуждением .....	157
6.9. Параллельная работа генераторов постоянного тока .....	160
6.10. Электрические двигатели постоянного тока .....	162

6.10.1. Пуск в ход двигателей постоянного тока .....	162
6.10.2 Саморегулирование двигателей .....	163
6.10.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока .....	164
6.10.4. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока .....	165
6.10.4.1. Двигатель параллельного возбуждения .....	165
6.10.4.2. Двигатель последовательного возбуждения .....	167
6.10.5. Реверсирование и торможение двигателей постоянного тока .....	169
6.10.6. Потери и КПД машин постоянного тока .....	170
<b>Глава седьмая. Асинхронные двигатели .....</b>	<b>172</b>
7.1. Общие сведения .....	172
7.2. Принцип действия асинхронного двигателя .....	172
7.3. Устройство асинхронного двигателя .....	173
7.4. Возбуждение вращающегося магнитного поля с помощью системы трехфазного тока .....	175
7.5. Многополюсная обмотка статора и частота вращения магнитного поля .....	178
7.6. Скольжение. Частота вращения ротора .....	180
7.7. Электродвижущие силы в обмотках статора и ротора .....	181
7.8. Потоки рассеяния. Индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора .....	182
7.9. Ток в обмотке ротора .....	183
7.10. Ток фазы обмотки статора .....	184
7.11. Схема замещения асинхронного двигателя .....	186
7.12. Векторная диаграмма асинхронного двигателя .....	188
7.13. Вращающий момент асинхронного двигателя .....	189
7.14. Зависимость вращающего момента двигателя от скольжения .....	191
7.15. Механическая характеристика асинхронного двигателя .....	193
7.16. Пуск в ход асинхронных двигателей .....	195
7.16.1. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором .....	196
7.16.2. Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором .....	198
7.17. Потери и КПД асинхронных двигателей .....	199
7.18. Рабочие характеристики асинхронного двигателя .....	200
7.19. Реверсирование и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей .....	202
7.20. Однофазный асинхронный двигатель .....	203

7.21. Однофазный двигатель с расщепленными полюсами .....	205
7.22. Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть .....	206
 Глава восьмая. <b>Синхронные машины</b> .....	
8.1. Общие сведения .....	207
8.2. Устройство и принцип действия трехфазного синхронного генератора .....	207
8.3. Работа генератора под нагрузкой и реакция якоря.....	209
8.4. Основные характеристики синхронного генератора .....	211
8.5. Уравнение электрического состояния фазы статора. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного генератора.....	213
8.6. Параллельная работа синхронных генераторов .....	214
8.7. Электромагнитный момент синхронной машины .....	216
8.8. Работа синхронной машины в режиме двигателя.....	218
8.9. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного двигателя.....	218
8.10. Синхронный компенсатор.....	219
8.11. Пуск синхронного двигателя .....	220
 Глава девятая. <b>Электротехнология</b> .....	
9.1. Общие понятия и область применения .....	222
9.2. Источники высокого напряжения для питания устройств электронно-ионной технологии.....	224
9.3. Электрофильтры для очистки газов .....	226
9.4. Аэроионизация .....	228
9.5. Электроаэрозольные распылители .....	232
9.6. Электроокраска .....	235
9.7. Электроэррозионная обработка металлов .....	237
9.8. Электросепарация сыпучих материалов .....	240
 Литература .....	
.....	244

**Учебное издание**

Дамба Дондокович (Дампилович) ДОНДОКОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Редактор *К.М. Баторов*

Подготовка оригинал-макета

**ИП Писаренко Е.Г.**

Лицензия Ж-3523

Лицензия ЛР № 020047 от 05.02.97.

Подписано в печать 06.10.98. Формат 60 × 84 1/16.  
Уч.-изд.л 16,0. Усл.печ.л. 14,7. Заказ № .  
Тираж 1000. Цена договорная

Издательство Бурятского госуниверситета  
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а