

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIV VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI**

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI
TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

Алиев А.Ш.



“ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА”

Конспект лекций

Ташкент – 2014

ЛЕКЦИЯ № 1

ВВЕДЕНИЕ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА И ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Основными элементами электротехнических установок являются источники и приемники (потребители) электрической энергии. С помощью источников осуществляется преобразование того или иного вида энергии в электрическую энергию. Так, генераторы преобразуют в электрическую энергию - механическую, гальванические элементы и аккумуляторы - химическую, термогенераторы - тепловую и т.д. Приемники, наоборот, преобразуют электрическую энергию в другие виды энергии. Например, электродвигатели преобразуют электрическую энергию в механическую, электронагревательные устройства - в тепловую, лампы накаливания - в лучистую и т.д.

Кроме источников и приемников, в состав электротехнических установок входят многие вспомогательные элементы: коммутационные аппараты, служащие для включения и отключения отдельных частей установки, регулировочные сопротивления, электроизмерительные приборы, защитные устройства и др.

Источники, приемники и вспомогательные элементы соединяются между собой с помощью изолированных друг от друга проводов и образуют в совокупности электрическую цепь установки. Различные элементы электрических цепей изображаются на электрических схемах в виде условных обозначений.

Сопротивления различных элементов электрических цепей, в том числе и сопротивления проводов (если последние должны быть приняты во внимание), изображаются в виде сосредоточенных в соответствующем месте схемы сопротивлений.

Электрические цепи бывают весьма разнообразными. Различают электрические цепи неразветвленные и разветвленные, с одним источником и с несколькими источниками, линейные и нелинейные.

Электрическая цепь представляет собой совокупность следующих основных элементов:

1. Источник электрической энергии;
2. Приёмник электрической энергии;
3. Устройства, с помощью которых электрическая энергия передаётся от источника к приёмнику (рис. 1.1).

В качестве источника постоянного тока могут быть: генератор постоянного тока, аккумуляторные батареи, гальванические элементы. Источник электрической энергии характеризуется величиной ЭДС (E) и собственным внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$. Генератор вместе с внутренним сопротивлением составляет внутреннюю цепь. Приёмник и токоведущие провода - внешняя цепь. ЭДС создаёт в замкнутой электрической цепи направленное движение электрических зарядов (электрический ток). Величина тока определяется количеством электричества, протекающего через поперечное сечение проводника за единицу времени.

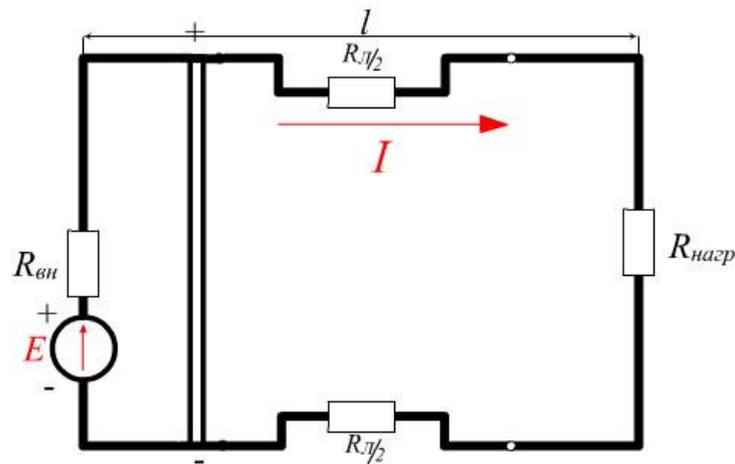


Рис. 1.1

$I = q/t$ Кл/с (А) в цепи постоянного тока.

$i = dq/dt$ - в цепи переменного тока.

«+» обозначается точка с более высоким потенциалом,

«-» точка с более низким потенциалом.

Направление тока во внешней цепи от «+» к «-», или от точки «1» к точке «2». ЭДС- величина, создающая определенную разность потенциалов на зажимах источника и вызывающая ток в замкнутой цепи.

Разность потенциалов дает напряжение цепи

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}$$

$U = \varphi_1 - \varphi_2 = E$ при холостом ходе, т.е. при отсутствии нагрузки. Направление ЭДС принято от «-» к «+». Сопротивление генератора называется активным, а сопротивление нагрузки и соединительных проводов пассивным.

$R = \rho l / s = l / \gamma s$, где

ρ - удельное сопротивление, l - длина проводника, s -сечение проводника.

Активным сопротивлением называется такой элемент электрической цепи, в которой происходит безвозвратная потеря энергии.

Величина сопротивления зависит от температуры.

$$r = r_0 [1 + \alpha (t_1 - t_2)]$$

$$r_0 \text{ при } t = +20^\circ\text{C}$$

При протекании тока в электрической цепи на отдельных участках цепи происходит падение напряжения, поэтому напряжение на зажимах нагрузки отличается от величины ЭДС источника.

$$U_{\text{нагр}} = E - IR_{\text{вн}} - IR_{\text{л}}$$

$U_{\text{нагр}}$ - напряжение на зажимах нагрузки,

E - ЭДС генератора

$IR_{\text{вн}} = U_{\text{г}}$ - падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника;

$IR_{\text{л}} = U_{\text{л}}$ - падение напряжения в линейных проводах.

ЛЕКЦИЯ № 2

Законы Кирхгофа. Простые токовые цепи. Эквивалентное преобразование пассивных участков электрических цепей

К основным законам электрической цепи относятся:

I. Закон Ома

II. Законы Кирхгофа.

III. Закон Джоуля-Ленца.

I. Закон Ома

Рассмотрим несколько вариантов написания закона Ома для различных участков электрической цепи и для замкнутой электрической цепи.

а) закон Ома для пассивного участка цепи:

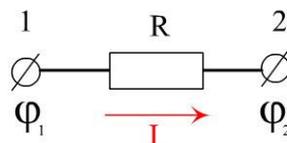


Рис. 1.2

Определим падение напряжения на данном участке цепи

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$U_{12} = IR$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = IR,$$

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2) / R \quad (1.1)$$

Ток, протекающий по пассивному участку цепи прямо пропорционален разности потенциалов и обратно пропорционален сопротивлению цепи.

б) закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.

Определим потенциал точки 3 (φ_3) относительно точек 1 и 2.

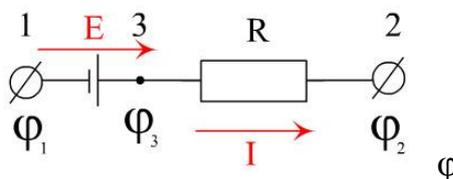


Рис.1.3

$$\varphi_3 = \varphi_1 + E$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 + IR$$

$$\varphi_1 + E = \varphi_2 + IR$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 + E = IR$$

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2 + E) / R \quad (1.2)$$

Ток, протекающий по участку цепи, содержащему ЭДС, прямо пропорционален разности потенциалов и ЭДС и обратно пропорционален сопротивлению данного участка цепи.

в) Закон Ома для замкнутой электрической цепи.

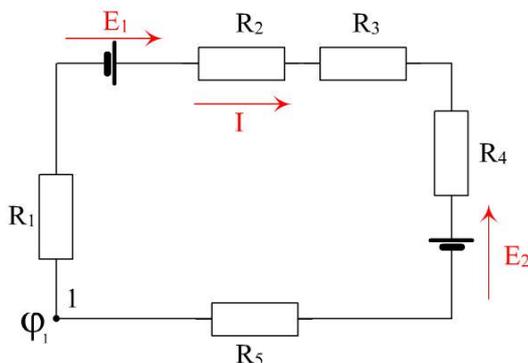


Рис. 1.4

Ищем потенциал точки 1 относительно этой же точки, предварительно задав направление тока (рис.1.4).

$$\varphi_1 - IR_1 + E_1 - IR_2 - IR_3 - E_2 - IR_4 + E_3 - IR_5 - E_4 - IR_6 = \varphi_1$$

$$E_1 - E_2 + E_3 - E_4 = I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)$$

$$E_1 - E_2 + E_3 - E_4 = \sum E$$

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = \sum R, \text{ отсюда}$$

$$I = \sum E / \sum R \quad (1.3)$$

II. Законы Кирхгофа.

1) 1^{ый} закон Кирхгофа.

Алгебраическая сумма токов входящих в узел равна алгебраической сумме токов, выходящих из узла; или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

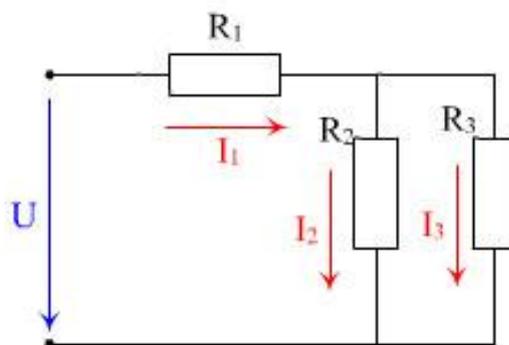


Рис. 1.5

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$\sum I = 0 \quad (1.4)$$

Ни в одной узловой точке электрической цепи не имеет место накопления электрических зарядов. Токи, входящие в узел - положительные токи, выходящие из узла - отрицательные.

2) 2^{ой} закон Кирхгофа.

Алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна алгебраической сумме падений напряжений на отдельных участках этого контура.

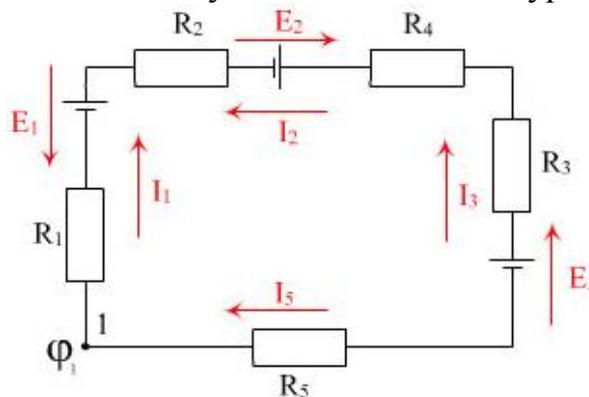


Рис. 1.6

Контур выделен из сложной электрической цепи. Зададимся направлением обхода контура по часовой стрелке (рис.1.6). Определим потенциал точки ϕ_1 относительно этой же точки.

$$\begin{aligned} \phi_1 - I_1 R_1 - E_1 + I_2 R_2 + E_2 + I_2 R_3 + I_3 R_4 - E_3 - I_4 R_5 &= \phi_1 \\ - E + E - E = \sum E = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_2 R_3 - I_3 R_4 + I_4 R_5 &= \sum IR \\ \sum E = \sum IR &\quad (1.5) \end{aligned}$$

III. Закон Джоуля-Ленца. Баланс мощности.

При прохождении тока по участку цепи с сопротивлением R происходит превращение электрической энергии в тепловую. Количество тепла, выделяемое при этом, прямо пропорционально квадрату тока, сопротивлению и времени, в течении которого этот ток проходит по участку цепи.

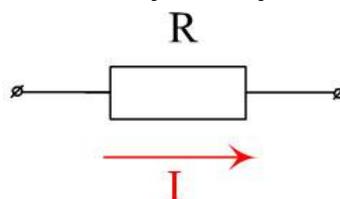


Рис. 1.7

$$\begin{aligned} Q &= 0,24 I^2 R t \text{ (кал)} \\ Q &= I^2 R t \text{ (Дж)}. \end{aligned}$$

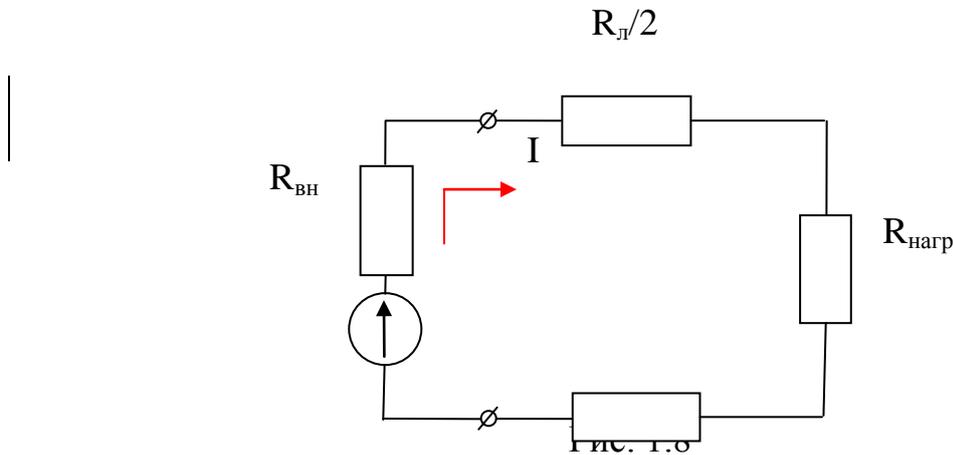
$$W = I^2 R t \quad (1.6)$$

Электрическая мощность- это количество электрической энергии, превращаемой в тепло за 1сек.

$$P = W/t \quad P = I^2R \quad I = U/R$$

$$P = U^2/R \quad P = UI - \text{основное выражение.}$$

Составим баланс мощности:



Запишем выражение для данного контура по 2-му закону Кирхгофа.

$$E = IR_{\text{вн}} + IR_{\text{л}} + IR_{\text{нагр.}}$$

Левую и правую части этого выражения умножим на I:

$$EI = I^2R_{\text{вн}} + I^2R_{\text{л}} + I^2R_{\text{нагр.}}, \text{ где}$$

EI - полная мощность данной цепи.

$I^2R_{\text{вн}}$ - потери мощности в генераторе.

$$I^2R_{\text{вн}} = \Delta P_{\text{генерат.}}$$

$I^2R_{\text{л}}$ - потери мощности в линии.

$$I^2R_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л.}}$$

$I^2R_{\text{нагр}} = P_{\text{наг}}$ - мощность потребляемая нагрузкой.

$$P = \Delta P_{\text{генерат}} + \Delta P_{\text{л}} + P_{\text{наг}}$$

ЛЕКЦИЯ №3

Однофазные токи. Цепи переменного тока. Синусоидальные электрические токи. Действующие значения тока и напряжения

Постоянный ток в настоящее время применяется реже, чем переменный. Его применение обуславливается либо ходом некоторых физических процессов, либо экономическими соображениями. Так, например, в электролизе, для зарядки аккумуляторов, а также используется для питания током трамваев, троллейбусов, электровозов. В остальных случаях современная техника использует переменный ток.

Преимущества переменного тока: 1). Позволяет сравнительно легко преобразовывать напряжение (из низкого в высокое и наоборот); 2). Электрические машины переменного тока просты в устройстве, надежны в работе и имеют относительно низкую стоимость производства; 3). Переменный ток при необходимости всегда можно преобразовать в постоянный ток.

Впервые был применен в 1876 г. Яблочковым для питания изобретенной им электрической свечи. В настоящее время в различных отраслях электротехники находят себе применение переменные токи различных частот:

- в радиотехнике – от 10^5 Гц до нескольких миллиардов Гц.
- в эл. печах – 500 Гц – 50 МГц.
- в телефонии – 100 Гц – несколько тысяч Гц.
- промышленное применение – 50 Гц (в США – 60 Гц)

Для получения токов высокой частоты используются ламповые генераторы. Для получения токов промышленной частоты – машинные генераторы или генераторы переменного тока.

Переменным током называется ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению.

Числовые значения, которые принимает переменный ток в определенные моменты времени называется его мгновенным значением.

Наибольшее из мгновенных значений любой переменной электрической величины называется ее максимальным значением или амплитудой.

Одна из особенностей переменного синусоидального тока заключается в том, что он является периодически изменяющейся величиной. В настоящее время все генераторы рассчитываются на получение синусоидальной кривой Э.Д.С. Это обеспечивает получение во всех звеньях линейной электрической цепи форму кривых напряжений и токов – синусоидальной или гармонической. (простота расчетов и отсутствие гармоник).

Промежуток времени T , в течение которого переменная величина проходит через все свои мгновенные значения или изменения и в дальнейшем начинает их повторять, называется периодом изменения данной величины.

За время одного периода ток дважды меняет свое направление и дважды проходит через максимальное значение (T – секунды).

Величина, обратная периоду, называется частотой тока f , т.е. частота – это количество периодов в секунду.

$$f = \frac{1}{T}; T = \frac{1}{f}.$$

Единицей измерения частоты является Герц (Гц; КГц; МГц).

$$f = 50 \text{ Гц}, T = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ сек.}$$

Для получения переменного синусоидального тока необходимо иметь источник с синусоидально изменяющейся Э.Д.С. Для этого служит генератор. Он состоит из статора и ротора. Во внутренней поверхности статора укреплена обмотка, в которой возникает Э.Д.С. Ротор представляет собой стержневой электромагнит, который удерживается внутри статора.

По числу полюсов ротора генераторы бывают 2^x , 4^x , $6^{\text{ти}}$ и т.д. полюсные. Для создания магнитного поля через роторную обмотку пропускают постоянный ток от постороннего источника. При вращении ротора, вместе с ним вращается его магнитное поле. Это поле пересекает витки статора, наводя в них Э.Д.С. изменяющегося по направлению. Каким же образом возникает синусоидальная Э.Д.С.

$E = Blv$, где l и v – постоянные величины. Придав особую форму ротора, можно обеспечить соответствующее распределение густоты силовых линий в воздушном зазоре. Числовые значения магнитной индукции для любой точки на внутренней поверхности статора определяется $B = B_m \sin \alpha$, где B_m – наибольшая магнитная индукция полюсов; α – угол осевой линии с подвижным радиусом.

В двухполюсном генераторе на протяжении всего воздушного зазора, охватываемого углом 360° магнитная индукция совершает один полный цикл.

Зная закон изменения магнитной индукции, можно определить и Э.Д.С. в обмотке статора при разных углах поворота ротора.

$$e = B_m lv \sin \alpha,$$

если учесть $E_m = B_m lv$, то $e = E_m \sin \alpha$.

За один оборот ротора Э.Д.С. совершит полный цикл изменений

Имея генератор синусоидальной Э.Д.С. и подключая к его зажимам внешнюю цепь, можно получить синусоидальный ток и синусоидальное напряжение. Если известно полное сопротивление цепи R , то можно определить мгновенное значение тока:

$$i = \frac{E_m}{R} \sin \alpha \text{ или } I_m = \frac{E_m}{R} \quad i = I_m \sin \alpha, \text{ аналогично}$$

$$U = I_m R \sin \alpha \text{ или } U = U_m \sin \alpha.$$

Выразим угол поворота ротора через угловую механическую скорость ω и время t , т.е. $\alpha = \omega t$, тогда $e = E_m \sin \omega t$; $i = I_m \sin \omega t$; $U = U_m \sin \omega t$.

В двухполюсном генераторе Э.Д.С. совершает один цикл за 360° . Но могут быть многополюсные генераторы, имеющие p – пар полюсов.

Поскольку график одного цикла изменений индукции можно построить только в пределах 360° , то считают, что именно такое количество градусных единиц и должно заключаться в дуге, на протяжении которой магнитная индукция совершает один полный цикл изменений, т.е. в 4-х полюсной машине эту дуга будет 180° , в 6-ти полюсной – 120° и т.д. Получается, что электрический градус в p раз меньше геометрического. $\alpha^\circ_{\text{эл}} = p \alpha^\circ_{\text{геом}}$.

В 2-х полюсном генераторе $\alpha_p = \alpha_{\text{геом}}$.

С физической точки зрения электрический градус учитывает распределение магнитной индукции в воздушном зазоре многополюсного генератора.

Наряду с электрическими градусами в теории переменного тока применяют и электрические радианы.

Электрический радиан – в p раз меньше геометрического радиана $\omega_э = p\omega_{геом}$ (рад/сек).

Угловая скорость вращения якоря называется механической угловой скоростью.

Угловая скорость вращения радиус-вектора называется электрической угловой скоростью или угловой частотой.

Одному обороту ротора соответствует p периодов, а n – оборотов – p периодов, или $f = \frac{np}{60}$ Гц. Или $n = \frac{60f}{p}$, т.е. для получения определенной частоты переменного тока необходимо, чтобы ротор совершал строго определенное количество оборотов.

Например, для $f=50$ Гц при $p=2$ $n = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500$ об/мин. Между частотой тока и угловой частотой существует зависимость: $\omega = 2\pi f$ рад/сек.

В технике переменных токов часто приходится иметь дело с тепловым или механическим действием тока.

О количестве энергии переменного тока в цепи можно судить по тому тепловому эффекту, который ток вызывает при своем протекании по проводнику.

Для учета теплового эффекта в теорию переменного тока введено действующее, или эффективное значение переменного тока.

Под действующим значением переменного тока понимают такое значение эквивалентного ему постоянного тока, который, проходя по тому же, что и переменный ток, проводнику с сопротивлением R , за равное время выделяет в этом проводнике одинаковое количество тепла.

В соответствии с этим, действующее значение переменного тока:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \text{ аналогично: } E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Вольтметры и амперметры, предназначенные для работы в цепях синусоидального тока, градуируются обычно ток, чтобы они показывали непосредственно действующее значение напряжения или тока.

Среднее значение: Для определения среднего значения полпериода:

$$E_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E_m \sin \omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_m \sin \omega t d\omega t = \frac{E_m}{n} |\cos \omega t|_0^{\pi} = E \frac{2}{\pi}.$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \frac{E}{E_{cc}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{E_m 2} \approx 1,11; E = 1,11 E_{cc}.$$

Ток и напряжение в течение одного периода проходит через все свои стадии изменения. Эти отдельные стадии изменения переменной величины

называется ее фазами. Каждой фазе соответствует определенное мгновенное значение тока и напряжения.

Напряжение и ток называется совпадающими по фазе, если они изменяются по одному и тому же закону и одновременно проходят через соответствующие фазы. При отсутствии последнего условия они не совпадают или сдвинуты по фазе.

Угол сдвига фаз обозначается буквой φ . $i = I_m \sin \omega t$; $U = U_m \sin(\omega t + \varphi)$.

При различных расчетах часто приходится определять переменный ток, как сумму двух или нескольких переменных токов. Суммируемые токи могут иметь различные амплитуды и должны быть сдвинутыми по фазе. Сложение можно выполнить графически, складывая алгебраически ординаты кривых в различных моментах и соединяя полученные точки.

Тот же результат может быть получен быстрее и легче при помощи векторной диаграммы. Если какая-либо точка движется с постоянной скоростью по окружности, то проекция ее на любой диаметр совершает синусоидальные колебания. Радиус-вектор этой точки вращается с постоянной угловой скоростью. Если этот радиус-вектор, в известном масштабе изображающий амплитуду тока, занимает в начальный момент ($t=0$) горизонтальное положение вправо от центра вращения и вращается против направления движения часовой стрелки с угловой скоростью ω , то в произвольный момент t , когда он образует горизонтально угол ωt , проекция его на вертикаль в том же масштабе изображает соответствующее мгновенное значение: $i = I_m \sin \omega t$. Если же вектор в начальный момент расположен не горизонтально, а образует горизонтально угол φ , то проекция на вертикаль будет $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, т.е. изображает ток опережающий предыдущий на часть периода, равную $\frac{\varphi}{360^\circ}$.

Угол φ считается положительным, когда он получается поворотом вектора «вперед», т.е. по направлению вращения, и отрицательным – в обратном положении.

Алгебраическая сумма мгновенных значений двух синусоидальных величин соответствует геометрической сумме векторов этих величин. Нужно сложить ток $i_1 = I_{m1} \sin \omega t$ и $i_2 = I_{m2} \sin(\omega t - 90^\circ)$.

Чтобы получить вектор I_m нужно сложить векторы I_{m1} и I_{m2} по правилу параллелограмма. Ток $i = i_1 + i_2$, т.е. сумме проекций векторов I_{m1} и I_{m2} .

$I_m = \sqrt{I_{m1}^2 + I_{m2}^2}$, а $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_{m2}}{I_{m1}}$, откуда определяется тот угол φ , на который

суммарный вектор отстает от вектора I_{m1} .

Так как целью построения векторной диаграммы является определение не мгновенных значений в какой-либо момент, а его амплитуды и сдвиг фаз, то изображения круговых путей концов векторов, вертикаль, горизонталь являются необязательным. Векторная диаграмма может состоять только из векторов, один из которых целесообразно располагаться вертикально или горизонтально, причем геометрическая сумма векторов может находиться

либо как диагональ построенного на них параллелограмма, либо как замыкающая сторона треугольника, получаемого при параллельном переносе одного из суммируемых векторов из центра диаграммы в конец другого вектора.

Правила построения векторных диаграмм:

1. Угол необходимо откладывать от вектора тока к вектору направленному по наикратчайшему угловому расстоянию. Угол, откладываемый против часовой стрелки, считается положительным, по часовой стрелке – отрицательным.

2. При геометрическом сложении однофазных величин они должны иметь одинаковую частоту.

3. Изображать векторами можно прямо действующие значения переменных величин, как пропорциональные максимальным.

4. При одновременном изображении линейных и векторных диаграмм векторы принято располагать левее линейных диаграмм. Причем так, чтобы их проекции на ось соответствовали мгновенным значениям переменных величин по линейным диаграммам для $t=0$.

ЛЕКЦИЯ №4

Электрические цепи содержащие R,L,C. Последовательное и параллельное соединение R,L,C. Частотные свойства цепей переменного тока

Рассмотрим распространение переменного тока по прямолинейному проводнику. Разобьем мысленно этот провод по всей его длине вдоль оси на ряд концентрических цилиндров.

Если по такому проводнику протекает постоянный ток, то плотность тока во всех кольцах будет одинакова, и вокруг каждого из них возникнет постоянное магнитное поле.

Предположим теперь, что по тому же проводнику пропускается переменный ток, очевидно, в этом случае возникающие вокруг концентрических цилиндров магнитные потоки будут также переменными и на основании закона электромагнитной индукции в каждом из них возникнет Э.Д.С индукции, увеличивающаяся по мере приближения проводников к оси провода.

Таким образом, возникающие переменные магнитные потоки в самом проводе наводят э.д.с. противодействующую основному напряжению, причем, чем ближе сечение к оси провода, тем больше это противодействие. В результате ток в сечении провода распределяется не с одинаковой плотностью, а с постепенно увеличивающейся от оси к поверхности провода.

Такое поверхностное распределение переменного тока называется поверхностным эффектом. Как видим, под влиянием поверхностного эффекта полезное сечение провода как бы уменьшается, а следовательно сопротивление его увеличивается. Ввиду этого, в отличие от сопротивления

проводника постоянному току, которое называется омическим сопротивлением, сопротивление проводника переменного току называется активным сопротивлением.

Активное сопротивление увеличивается с увеличением частоты переменного тока.

Если синусоидальное напряжение $U=U_m \sin \omega t$ приложено к зажимам цепи, имеющей сопротивление R , но не образующей сколько-нибудь заметной индуктивностью и емкостью, то по закону Ома мгновенное значение тока $i = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t$, но $\frac{U_m}{R} = I_m$, значит $i = I_m \sin \omega t$.

Таким образом, ток, как и напряжение, изменяется синусоидально, достигая своего положительного максимума I_m при $\sin \omega t = 1$, т.е. одновременно с напряжением. Это значит, что ток и напряжение совпадают по фазе.

Так как действующее значение тока и напряжения равны соответственно $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$; $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, то $\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ или $I = \frac{U}{R}$, т.е. в цепи, не обладающей реактивным сопротивлением, действующее значение тока и напряжения подчиняются закону Ома, как и для цепи постоянного тока.

Если цепь, к зажимам которой приложено синусоидальное напряжение, обладает не только активным сопротивлением R , но и индуктивностью L , то происходящий в ней процесс, осложняется, появлением Э.Д.С самоиндукции $e = -L \frac{di}{dt}$, пропорциональной скорости изменения тока, последний создается теперь совместными действиями внешнего напряжения и Э.Д.С самоиндукции.

$$e = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = -L \omega I_m \cos \omega t = -L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); u = L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

По закону Ома мгновенное значение тока $i = \frac{U + e}{R}$ или $U = iR - e = iR + L \frac{di}{dt}$.

Пользуясь этим соотношением, найдем закон изменения тока, а затем его действующее значение. Ток в цепи будет изменяться по синусоидальному закону.

Предположим $i = I_m \sin \omega t$, т.е. принимаем за начало отсчета времени момент, когда ток проходит через нуль, тогда

$$e = -L \frac{di}{dt} = L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = -I_m L \omega \sin(\frac{\pi}{2} - \omega t) = I_m \omega L \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \text{ откуда } U = iR - e = I_m R \sin \omega t -$$

$$I_m \omega L \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_m R \sin \omega t + I_m \omega L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Первый член правой части этого уравнения представляет собой синусоидально изменяющуюся величину с амплитудой $I_m R$, совпадающую по фазе с током, а второе слагаемое – синусоидально изменяющуюся величину с амплитудой $I_m \omega L$ опережающую ток на $\frac{1}{4}$ периода (90°).

Первая из этих величин называется активным напряжением (активной составляющей), а вторая индуктивной реактивной составляющей или индуктивным реактивным напряжением.

Сдвиг между второй составляющей и током на 90° можно объяснить так: Пусть ток имеет максимальное значение. В начале убывания тока возникает Э.Д.С самоиндукции противодействующая убыванию тока, т.е. Э.Д.С действует по направлению тока от нуля, достигая своего максимального значения при $i=0$. С возрастанием тока от 0 до амплитудного значения Э.Д.С самоиндукции должна препятствовать нарастанию тока, т.е. действовать навстречу ему, убывая до 0. Наибольшая скорость изменения тока, практически выражается тангенсом угла наклона касательной к кривой i , соответствует точкам пересечения кривой тока с осью t_a . В эти моменты Э.Д.С самоиндукции достигает максимального значения.

Падение напряжения U_L на индуктивном сопротивлении противоположно Э.Д.С самоиндукции.

Отсюда видно, что напряжение на катушке индуктивности опережает ток на 90° .

Действующие значения активного и реактивного напряжений найдем разделив амплитуды составляющей на $\sqrt{2}$.

$$\frac{I_m R}{\sqrt{2}} = U_a \frac{I_m \omega L}{\sqrt{2}} = U_L \text{ или } IR = U_a; I \omega L = U_L.$$

Действующее значение полного напряжения равно геометрической сумме действующих значений слагающих, т.е. $U = U_a + U_L$.

Построим векторную диаграмму.

Из прямоугольного треугольника АОВ легко устанавливается соотношение между величинами U и I .

$$I^2 R^2 + I^2 (\omega L)^2 = U^2$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \text{ Закон Ома}$$

$$\text{Угол } \varphi \text{ получается } \operatorname{tg} \varphi = \frac{I \omega L}{IR} = \frac{\omega L}{R}.$$

Выражение $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ имеющее размерность сопротивления называется полным сопротивлением.

Закон Ома показывает, что действующее значение переменного тока в цепи, обладающей индуктивностью получается меньше, чем постоянный ток в той же цепи, при таком же по величине постоянном напряжении.

Полное сопротивление обозначается буквой Z , а $\omega L = X_L$ - индуктивным сопротивлением. Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте тока. R - активное сопротивление.

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \text{ и тогда } I = \frac{U}{Z}.$$

Построим векторную диаграмму для сопротивлений. Если все стороны треугольника АОВ разделить на I , то получим треугольник сопротивлений.

Пользуясь этим треугольником можно находить полное сопротивление цепи или сдвиг фаз между напряжением и током графическим путем.

Кроме того, этот же треугольник позволяет установить еще следующие соотношения:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \sin \varphi = \frac{X_L}{Z}.$$

Если активное сопротивление цепи мало, то им можно пренебречь в выражении общего сопротивления. Тогда $Z=X_L=\omega L$; $I=\frac{U}{\omega L}$.

В этом случае, т.к. при чистом индуктивном сопротивлении ток отстает от напряжения на 90° , т.к. $\operatorname{tg} \varphi = \infty$, отсюда $\varphi = 90^\circ$.

Выводы:

1. В цепи только с одним индуктивным сопротивлением ток отстает от напряжения на угол $\varphi = 90^\circ$. Этот ток называется реактивным или безваттным током, т.к. он не расходует в цепи своей мощности.

2. В цепи с R и L ток отстает от напряжения на угол $\varphi = 90^\circ$.

3. Действующие значения переменных величин не подчиняются законам постоянного тока в обычной их форме.

4. Индуктивное сопротивление X_L учитывает влияние Э.Д.С. самоиндукции на величину действующего значения тока в цепи и находится в прямо пропорциональной зависимости от частоты тока.

Рассмотрим цепь, состоящую из последовательно соединенных активных и индуктивных сопротивлений.

В этом случае приложенное к цепи переменное напряжение является геометрической суммой всех активных напряжений, каждое из которых совпадает по фазе с током, и всех реактивных напряжений, каждое из которых опережает ток на 90° . Поэтому, суммарное активное напряжение будет равно арифметической сумме всех активных напряжений.

$U_a=IR_1+IR_2+IR_3+\dots=I\sum R$, а суммарное реактивное напряжение – арифметической сумме всех реактивных напряжений.

$$U_p=IX_{L1}+IX_{L2}+IX_{L3}+\dots=I\sum X_L.$$

Таким образом: $R=R_1+R_2+R_3+\dots$

$$X_L=X_{L1}+X_{L2}+X_{L3}+\dots, \text{ а } z=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{(\sum R)^2+(\sum X_L)^2}.$$

В общей форме закон Ома для последовательного соединения нескольких активных и индуктивных сопротивлений будет выглядеть так:

$$I=\frac{U}{\sqrt{(R^2)+(X_L)^2}}.$$

Если к зажимам генератора, создающего синусоидальное напряжение, присоединить конденсатор емкостью C, последний будет периодически заряжаться и разряжаться, и следовательно, в соединительных проводах будет иметь место переменный ток. Пусть напряжение генератора $U=U_m \sin \omega t$. Если за бесконечно малый промежуток времени dt напряжение на зажимах

конденсатора изменилось на величину dU , если при этом на обкладки конденсатора перешло электричество dq , то $dq=CdU_c$, где dU_c - напряжение на обкладках конденсатора.

Поделив обе части равенства на, получим $\frac{dq}{dt} = C \frac{dU_c}{dt}$.

Левая часть представляет собой ток в цепи $i=C \frac{dU_c}{dt}$.

Подставим выражение для U_c : $i=C \frac{dU_m \sin \omega t}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t$ или $i=\omega C U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$.

Мы видим, что: ток так же изменяется по синусоидальному закону и опережает напряжение на угол 90° .

Амплитуда тока $I_m=U_m \omega C$.

Поделив на обе части равенства, получим действующее значение тока $I=U \omega C$.

Произведение ωC имеет размерность проводимости и называется емкостной проводимостью. Обратная величина $\frac{1}{\omega C}$ называется емкостным сопротивлением α_c .

Мы видим, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока цепи.

Рассмотрим линейные и векторные диаграммы.

Получающийся сдвиг фаз на 90° можно объяснить следующим образом:

В течении первой четверти периода от точки 0 до точки 1, напряжение сети, приложенное к конденсатору возрастает от нуля до максимальной величины. В течении этого времени заряды протекают на обкладке конденсатора. Ток, равный скорости изменения заряда на обкладках, в точке 0 получает наибольшее значение, т.к. в этот момент имеет место наибольшее изменение напряжения на обкладках в точке 1 ток становится равным 0, т.к. в этот момент приложенное напряжение, достигнув максимума, перестает возрастать, а следовательно, перестает возрастать заряд на обкладках конденсатора.

В течение четверти периода от точки 1 до точки 2 напряжение сети постепенно падает. Это вызывает отсекание заряда обратно в сеть, т.е. отрицательный ток.

В точке 2 изменение приложенного напряжения наибольшее и скорость отсекаания зарядов (ток) также достигает наибольшего значения. После точки 2 процесс зарядки начнет повторяться в обратном направлении. На участке 2-3 конденсаторы заряжаются, на участке 3-4 разряжаются. При заряде конденсатора Э.Д.С. емкости направлена навстречу тока, а при разряде – совпадает по закону с током.

Если кроме емкости C в цепи имеется активное сопротивление R соединенное с емкостью последовательно, то приложенное к цепи напряжение является суммой двух слагающих, активного напряжения $U_a=IR$ и реактивного

напряжения $U_p = I \frac{1}{\omega C}$; первое совпадает с током по фазе, а второе отстает от тока на 90° .

В итоге общее напряжение отстает от тока на угол φ .

Из треугольника напряжений можно определить $U_2 = U_a^2 + U_p^2 = I^2 R^2 + I^2 \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2$, откуда $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$.

Закон Ома

Величина $\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ называется общим сопротивлением цепи Z , следовательно $I = \frac{U}{Z}$.

Построим векторный треугольник сопротивлений для чего разделим стороны треугольника АОВ на I .

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_C}{Z}.$$

Так как в цепи с емкостью ток опережает напряжение, а в цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения, то, следовательно, емкостное сопротивление в цепи переменного тока по своей роли противоположно индуктивному. Если цепь состоит из ряда последовательных емкостных и активных сопротивлений, то расчеты производятся аналогично расчетам индуктивных и активных сопротивлений.

Наиболее общий случай неразветвленной цепи переменного тока представляет собой цепь, состоящую из последовательного соединения R , L и C .

Приложенное к цепи напряжение составляется из трех слагаемых: активного напряжения $U_a = IR$, совпадающего по фазе с током; индуктивного – $U_L = I\omega L$, опережающего ток на 90° , емкостного $U_C = I \frac{1}{\omega C}$, отстающего от тока на 90° .

Благодаря тому, что U_L и U_C имеет противоположные фазы, их геометрическая сумма равносильна вычитанию соответствующих абсолютных величин, т.е. $U_p = U_L - U_C = I\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$, т.е. $x = \omega L - \frac{1}{\omega C}$.

Обобщенное реактивное сопротивление позволяет определить характер сопротивления цепи x . Если x получим положительным, то сопротивление носит индуктивный характер, если отрицательным – емкостной, т.е. или ток отстает от напряжения или опережает.

Приложенное к цепи напряжение представляется на векторной диаграмме гипотенузой прямоугольного треугольника:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = I \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad \text{отсюда:} \quad I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad \text{где}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Разделив стороны треугольника напряжений на силу тока, мы получим треугольник сопротивлений. Отсюда: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$; $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$; $\sin \varphi = \frac{X}{Z}$.

При положительном реактивном сопротивлении угол φ получается положительным, т.е. преобладает индуктивность и приложенное напряжение опережает ток; при отрицательном реактивном сопротивлении угол φ отрицательный, т.е. преобладает емкость и приложенное напряжение отстает от тока. $I = I_m \sin \omega t$; $U = U_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Рассмотрим цепь, состоящую из трех параллельных ветвей: активного сопротивления, индукции и емкости.

Напряжения, приложенные к каждой ветви, равны напряжению $U = U_m \sin \omega t$.

Определим ток в каждой ветви:

$$I_R = \frac{U}{R} = gU, \quad \text{где } g = \frac{1}{R} \text{ - активная проводимость;}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = b_L U, \quad \text{где } b_L = \frac{1}{\omega L} \text{ - индуктивная проводимость;}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = b_C U, \quad \text{где } b_C = \omega C \text{ - емкостная проводимость.}$$

По первому закону Кирхгофа общий ток цепи равен алгебраической сумме токов в ветвях $i = i_a + i_L + i_C$.

Для векторных значений токов нужно взять геометрическую сумму $I = I_R + I_L + I_C$; $i = \frac{U}{R} \sin \omega t + \frac{U}{X_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{U}{X_C} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Произведем сложение векторов (для случая $b_L > b_C$, т.е. $I_L > I_C$) из векторной диаграммы: $I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$.

Закон Ома для всей цепи: $I = \frac{U}{Z} = yU$, где $y = \frac{1}{Z}$ - кажущаяся проводимость всей цепи.

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b_L - b_C}{g} = \frac{b}{g}, \quad \text{где } b = b_L - b_C \text{ - реактивная проводимость цепи.}$$

Из треугольника токов можно определить, что при $b_L > b_C$ угол $\varphi > 90^\circ$, т.е. ток потребляемый из сети отстает от приложенного напряжения; при $b_C > b_L$ угол $\varphi < 0$ и ток опережает приложенное напряжение.

Построим треугольник проводимости. Из этого треугольника можно определить: $\cos \varphi = \frac{g}{y}$ или $g = \frac{\cos \varphi}{z} = y \cos \varphi$;

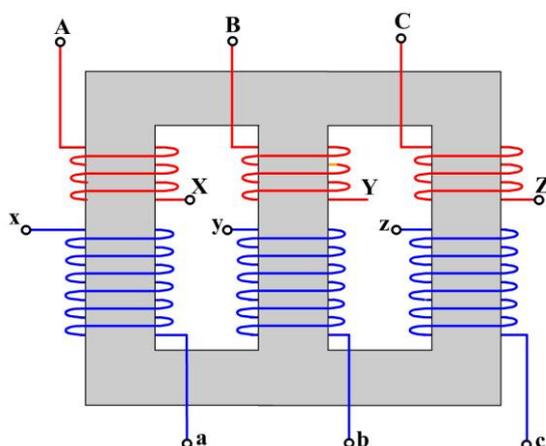
$$\sin \varphi = \frac{b}{y} \text{ или } b = \frac{\sin \varphi}{z} = y \sin \varphi.$$

Эти выражения универсальны и справедливы для цепей любой сложности.

ЛЕКЦИЯ №5

Трехфазные цепи. Способы соединения фаз источника и приемников. Трансформаторы

Трансформация трехфазного тока может осуществляться тремя однофазными трансформаторами или специальными трехфазными трансформаторами. В большинстве случаев применяют трехфазные трансформаторы, т.к. они дешевле и имеют меньшие габариты, чем группа однофазных. Только при передаче энергии большой мощности используют однофазные трансформаторы. Это объясняется главным образом условиями технологического процесса изготовления мощных трансформаторов на заводе и возможностью их перевозки.



Трехфазный трансформатор был изобретен в 1880-х годах русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским.

На каждом из трех стержней, набранных из листовой стали и объединенных сверху снизу яром, расположены первичная и вторичная обмотки одной фазы. Начальные выводы обмотки высшего напряжения обозначаются А, В, С, конечные выводы - X, Y, Z. Для выводов обмоток низшего напряжения применяются обозначения малыми буквами, например а, в, с, х, у, z.

Магнитные потоки трех фаз Φ_1, Φ_2, Φ_3 сдвинуты относительно друг друга во времени на $1/3$ периода или по фазе на 120 мгновенные значения их суммы равны нулю. Поэтому поток в любом из стержней в каждый момент времени

равен алгебраической сумме потоков двух других стержней. Магнитные сопротивления путей для двух крайних потоков Φ_1 и Φ_3 больше, чем для среднего потока Φ_2 что вызывает некоторую не симметрию намагничивающих потоков различных фаз. Однако эта не симметрия не имеет практического значения.

Трехфазный трансформатор меньше по массе и габаритам группы из трехфазных трансформаторов. Однако один однофазный из трехфазной группы меньше по массе и габаритам легче транспортируется, чем трехфазный трансформатор на полную мощность.

Автотрансформатор отличается тем, что связь между первичной и вторичной обмоткой электроэнергия преобразуется в другие виды не при помощи электромагнита, а при помощи электричества.

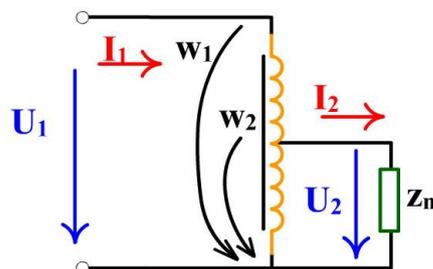


Рис.

Автотрансформатор представляет собой одну обмотку, которая намотана на сердечник из ферромагнитного материала и сделано ответвление. К первичной обмотке, имеющей w_1 витков, подводится напряжение V_1 .

Напряжение V_2 берется от части витков w_2 первичной обмотки.

Обмотка автотрансформатора, так же, как и у обычного трансформатора, расположена на стальном замкнутом магнитопроводе. При нагрузке можно приближенно считать.

Так как I_1 и I_2 сдвинуты по фазе почти на 180, то по общей части обмотки будет

$$I' = I_2 - I_1 = (k - 1)I_1 = \frac{k - 1}{k} I_2$$

Это позволяет выполнить общую часть обмотки меньшего сечения по сравнению с вторичной обмоткой трансформатора. Выгода получается тем больше, чем ближе $k \rightarrow 1$. Верхняя часть обмотки, по которой протекает первичный ток, содержит число витков

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{k - 1}{k} \omega_1$$

По сравнению с первичной обмоткой обычного трансформатора и здесь расход обмоточной меди получается меньше в $(k-1)/k$ раз.

Уменьшение объёма обмоток выражается также и уменьшением массы стали. Поэтому и преимущества:

1. Экономия ферромагнитного материала.
2. Экономия цветного металла.

Недостаток: $k < 1$

При $k > 1$ он не применяется.

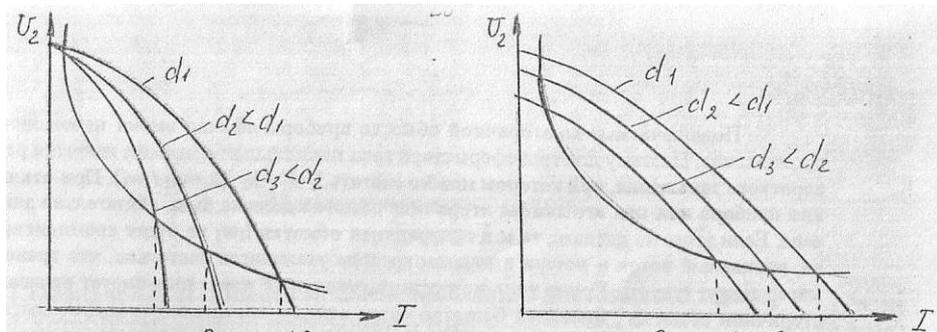
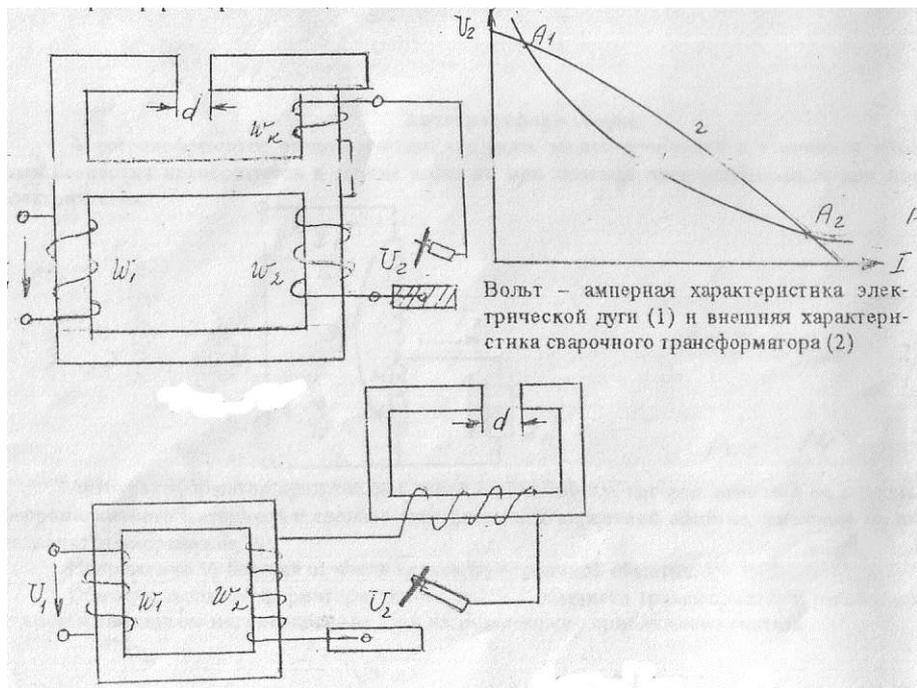
В конструктивном отношении имеется большое разнообразие сварочных трансформаторов. В значительной степени это определяется видом сварки (дуговая, стыковая, шовная, точечная).

При дуговой сварке вольт - амперная характеристика дуги имеет вид, показанный кривой 1. Вольт - амперная характеристика или внешняя характеристика трансформатора, т.е. источника питания дуги, должна иметь точку пересечения с вольт - амперной характеристикой дуги, чтобы ее горение было устойчивым. Следовательно, сварочный трансформатор должен иметь круто падающую внешнюю характеристику (кривая 2). Зажигание дуги происходит в точке A_1 при напряжении 60-70 В, устойчивое горение дуги - в точке A_2 при напряжении 12-30 В и при большом токе.

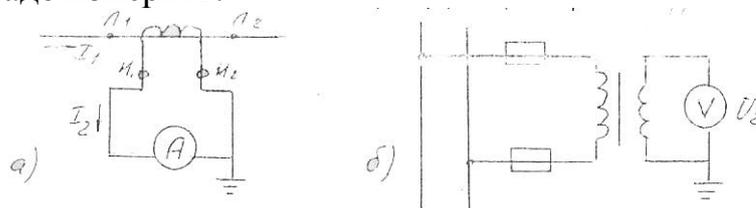
Для получения круто падающей внешней характеристики можно использовать включенную последовательно с вторичной обмоткой индуктивную катушку с большим индуктивным сопротивлением (реактор) или обеспечить большие магнитные потоки рассеяния (большое x_k) в самом трансформаторе. В качестве примеров на рисунке показаны принципиальные схемы сварочных трансформаторов, в которых использованы указанные способы получения необходимых внешних характеристик. При изменении воздушного зазора d меняется индуктивное сопротивление реактора или самого трансформатора, и, соответственно, наклон внешней характеристики. Плавное регулирование путем изменения зазора d и регулирование ступенями путем изменения числа витков применяются и в варианте «а», и в варианте «б».

Для плавного уменьшения электрической дуги в принципе можно использовать автотрансформаторы. Но, т. к. в них первичная и вторичная обмотки электрически связаны, то электросварщики могут попасть под полное напряжение сети 200 или 300 В, что недопустимо с точки зрения техники безопасности. Поэтому обычно автотрансформаторы с этой целью не используются.

В электроустановках переменного тока большой мощности и напряжением выше 1000 В непосредственное включение электроизмерительных приборов невозможно, т. к. номинальные значения напряжения и токи приборов не соответствуют номинальным значениям напряжения и тока электроустановок. Для расширения пределов измерения приборов и для изоляции их от высокого напряжения применяют измерительные трансформаторы, трансформаторы тока и трансформаторы напряжения.



Кроме измерительных приборов к вторичным обмоткам измерительных трансформаторов подключают обмотки других аппаратов. Мощность измерительных трансформаторов от пяти до нескольких сотен вольт - ампер. Трансформатор тока используют для расширения пределов измерения амперметров и последовательных обмоток ваттметров, счетчиков энергии и фазометров. Его первичную обмотку включают последовательно в ту цепь, ток в которой надо измерить.



Она обычно состоит из одного или нескольких витков. Выводы первичной обмотки обозначают L_1 и L_2 . К зажимам вторичной обмотки подключают амперметр или последовательные обмотки ваттметра, счетчика и фазометра. Чтобы ток во вторичной обмотке был меньше измеряемого первичного тока, число витков вторичной обмотки делают большим. Вывод вторичной обмотки обозначают U_1 и U_2 (измерительные приборы). Вторичную обмотку и

металлические части кожуха заземляют. Это вызвано требованиями техники безопасности для защиты обслуживающего персонала от возможного поражения током высокого напряжения при пробое изоляции между первичной и вторичной обмотками. Подключаемые к вторичной обмотке приборы обычно имеют небольшое сопротивление. Поэтому для трансформатора тока нормальным режимом является режим короткого замыкания, при котором можно считать $I_2 = I_1/k_2$ ($k_1 = w_2/w_1$). При отключе-

нии прибора или при его замене вторичная обмотка должна быть обязательно замкнута. Если этого не сделать, то м.д.с. первичной обмотки $I_1 w_1$ не будет скомпенсирована, магнитный поток и потери в магнитопроводе увеличатся настолько, что трансформатор может сгореть. Кроме того, возросший магнитный поток индуцирует на зажимах вторичной обмотки, имеющей большое число витков, значительную Э.Д.С. (сотни, и даже тысячи вольт). Стандартные номинальные первичные токи трансформаторов тока от 5 до 15000А, номинальный вторичный ток 5А (у некоторых трансформаторов тока - 1 А). Поэтому к вторичной обмотке следует присоединять приборы, номинальный ток которых равен 5А. При соблюдении этого условия цена деления приборов определяется по номинальному первичному току трансформатора тока.

Трансформаторы напряжения применяют в сетях напряжения для измерения напряжения и частоты. К вторичной обмотке подключают вольтметры, частотомеры и параллельные обмотки ваттметров, счетчиков и фазометров, т. е. обмотки, имеющие большое сопротивление.

ЛЕКЦИЯ № 6

Машины постоянного тока. Машины переменного тока.

Асинхронные электродвигатели.

Несмотря на преимущественное распространение электроэнергии переменного тока, электрические машины постоянного тока в настоящее время широко применяются в качестве двигателей и несколько меньше — в качестве генераторов. Это объясняется важными преимуществами двигателей постоянного тока перед другими электродвигателями: они допускают плавное регулирование частоты вращения простыми способами и обладают лучшими пусковыми качествами— развивают большой пусковой момент при относительно небольшом токе. Поэтому их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте.

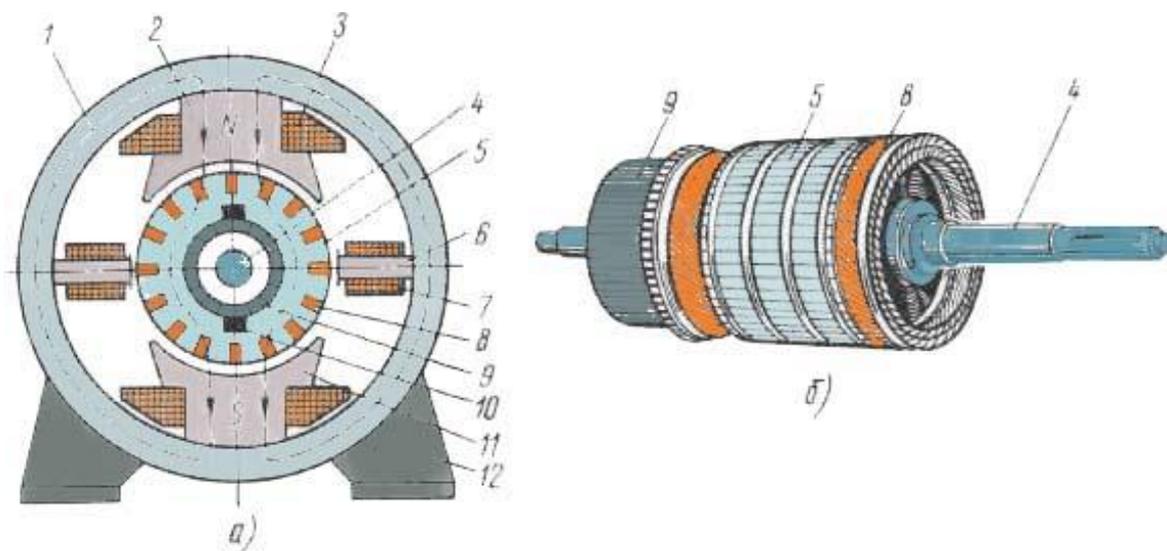
Электродвигатели постоянного тока часто являются исполнительными звеньями систем автоматического регулирования, а специальные генераторы используются как усилители электрических сигналов управления и как тахогенераторы — датчики частоты вращения.

Генераторы низкого напряжения (6—12 В) применяют для питания электролитических ванн (токи до 10 000 А), зарядки аккумуляторных батарей, высококачественной сварки (напряжения 20—70 В).

Машины постоянного тока входят в состав автомобильного, судового и самолетного электрооборудования, дорожностроительных машин. Диапазон мощностей машин постоянного тока достаточно широк — от единиц ватт (микромашин) до 9000 кВт (крупные двигатели для прокатных станков, гребных винтов кораблей).

Наиболее распространены машины общепромышленного применения серии П, выпускаемые как двигатели или как генераторы на мощности 0,15—200 кВт, частоты вращения 2870—550 об/мин (более мощные машины — тихоходные), напряжения 110—460 В.

При целом ряде преимуществ машины постоянного тока имеют существенный недостаток, связанный с работой так называемого щеточно-коллекторного узла. При определенных неблагоприятных условиях щетки могут искрить, что снижает надежность работы и требует надзора и ухода за машиной. Такую машину нельзя использовать во взрывоопасных средах. Коллектор усложняет и удорожает ее конструкцию и эксплуатацию по сравнению с бесколлекторной машиной переменного тока.



Генераторы и двигатели постоянного тока устроены одинаково. Неподвижная часть машины, называемая статором а), состоит из массивного стального корпуса 1, к которому прикреплены главные полюсы 2 и дополнительные полюсы б. Исходя из технологических и других соображений главные полюсы изготовляют чаще из отдельных стальных листов; иногда их изготовляют сплошными. Из отдельных листов либо сплошными изготовляют и дополнительные полюсы. Перечисленные детали статора являются также и деталями его магнитопровода. На главных полюсах размещают катушки одной или нескольких обмоток возбуждения 3, на дополнительных полюсах — катушки 7 обмотки дополнительных полюсов.

В подшипниковых щитах, прикрепленных с торцевых сторон к корпусу, расположены подшипники, несущие вал 4 вращающейся части машины, называемой якорем. На валу закреплен цилиндрический сердечник якоря 5, который для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов набирают из стальных листов. В пазах, расположенных по поверхности якоря, уложена обмотка якоря 8. Так же, как обмотку возбуждения и обмотку дополнительных полюсов, ее изготавливают из медного изолированного провода. Выводы от обмотки якоря присоединяют к расположенному на валу коллектору 9. Последний представляет собой цилиндр, состоящий из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. К коллектору с помощью пружин прижимаются графитные, угольно-графитные или металлографитные щетки 10. Щетки расположены в специальных щеткодержателях.

Обмотка возбуждения машины питается постоянным током и служит для создания основного магнитного поля, а условно с помощью двух линий магнитной индукции, изображенных пунктиром.

Главные полюсы имеют полюсные наконечники 11, служащие для получения по большей части окружности якоря одного и того же воздушного зазора между сердечником якоря и главными полюсами. Это необходимо для получения на большей части окружности якоря одной и той же магнитной индукции, а в проводниках обмотки якоря — постоянной по значению ЭДС. Дополнительные полюсы предназначены для уменьшения искрения под щетками.

В зависимости от мощности и напряжения машины могут иметь и большее число полюсов. При этом соответственно увеличиваются число комплектов щеток и дополнительных полюсов. Крепление машины к фундаменту, специальным салазкам или металлоконструкции осуществляется с помощью лап 12. Корпус некоторых машин снабжается для крепления специальными фланцами.

Благодаря полюсным наконечникам магнитная индукция в воздушном зазоре распределяется примерно по трапецеидальному закону. У поверхности якоря при $\alpha = 0$ магнитная индукция $B = 0$; с увеличением α магнитная индукция сначала возрастает, под большей частью северного полюса имеет постоянное значение, а при $\alpha = 180^\circ$ уменьшается до нуля. В пределах от $\alpha = 180^\circ$ до 360° магнитная индукция изменяется по такому же закону, но условно считается отрицательной.

Направление ЭДС проводника, находящегося в пазу магнитопровода якоря, определяется по правилу правой руки, а ее значение B — по формуле:

$$e_{np} = Blv, \text{ где}$$

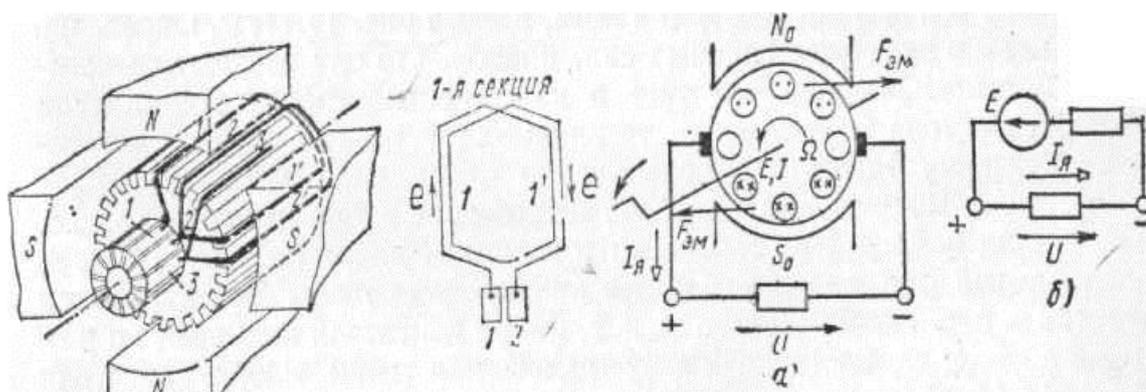
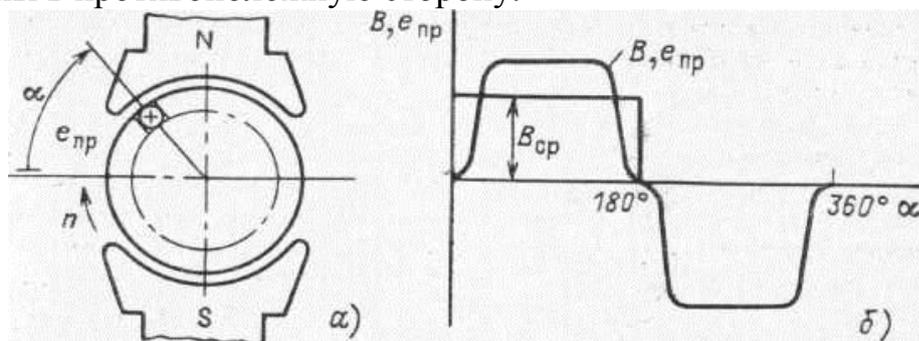
B — магнитная индукция, Тл;

l — длина проводника, м;

v — скорость перемещения проводника, м/с.

Очевидно, при $v = \text{const}$ $e_{np} \sim \kappa B$ и график $B(\alpha)$ в другом масштабе представляет собой график $e_{np}(\alpha)$. Изменение знака ЭДС e_{np} означает изменение ее направления по сравнению с положительным направлением.

Если в пазах, находящихся под северным полюсом, имеется несколько проводников, то ЭДС всех проводников будут иметь, очевидно, одно и то же направление; во всех проводниках якоря у южного полюса ЭДС будут направлены в противоположную сторону.



Принцип действия генератора. Допустим, что якорь машины вращается с помощью какого-то двигателя в направлении, указанном стрелкой. Если щетки генератора соединить с каким-либо приемником Γ , то под действием ЭДС генератора в обмотке якоря и приемника появится ток, приемник начнет потреблять электрическую энергию, а машина будет ее отдавать, т. е. будет работать в качестве генератора. Естественно, что электрическая энергия, вырабатываемая генератором, преобразуется из механической энергии двигателя, вращающего якорь генератора.

Направление тока в проводниках обмотки якоря генератора совпадает, конечно, с направлением ЭДС проводников и при вращении якоря изменяется. Однако с помощью коллектора изменяющийся по направлению ток проводников преобразуется в неизменные по направлению токи параллельных ветвей $i_{пар}$ и ток внешней цепи $i_{я}$, называемый током якоря. Согласно первому закону Кирхгофа для рассматриваемого генератора $i_{я} = 2i_{пар}$. Машины постоянного тока могут иметь число параллельных ветвей больше двух. Обозначив в общем случае число параллельных ветвей $2a$, получим:

$$I_{я} = 2ai_{пар}$$

Если воспользоваться правилом левой руки, нетрудно установить, что генератор развивает электромагнитный момент, направленный против направления вращения, т. е. является тормозящим.

Изменение полярности щеток и, следовательно, направлений ЭДС, напряжения и тока во внешней цепи генератора¹ возможно произвести одним из двух способов:

1) изменением направления магнитного поля главных полюсов, что осуществляется изменением направления тока обмотки возбуждения, располагаемой на главных полюсах;

2) изменением направления вращения якоря генератора с помощью приводного двигателя. Обычно используется первый способ.

Предположим, что якорь той же машины неподвижен. Если от источника постоянного тока подвести к якорю двигателя напряжение, то во внешней цепи и в обмотке якоря возникнут токи, направление которых будет противоположным указанным на рисунке. С помощью правила левой руки можно установить, что на якорь будет действовать вращающий электромагнитный момент и якорь начнет вращаться против часовой стрелки. При вращении в обмотке якоря возникнет ЭДС, которая согласно правилу правой руки будет направлена, против тока двигателя. Противоположные направления тока и ЭДС говорят о том, что в машине происходит преобразование электрической энергии в механическую. Двигатель разгонится до такой частоты вращения, при которой его момент станет равным моменту, обусловленному нагрузкой.

Говоря о принципе действия двигателя, нельзя не остановиться на назначении коллектора в этом случае. Коллектор необходим для того, чтобы неизменный по направлению ток внешней цепи преобразовывать в изменяющийся по направлению ток в проводниках обмотки якоря при его вращении. Только благодаря коллектору ток всех проводников, находящихся под одним полюсом, имеет одно и то же направление. Вследствие этого остается неизменным и направление вращающего момента, развиваемого двигателем.

Для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление развиваемого им вращающего момента. Это можно сделать одним из двух способов:

1) изменением полярности напряжения, подводимого к якорю двигателя и, следовательно, направления тока якоря;

2) изменением направления магнитного потока главных полюсов. Обычно используется первый способ.

Рассмотрев принципы действия генератора и двигателя, можно сделать вывод о том, что машины постоянного тока обратимы. Это значит, что при определенных условиях генераторы могут работать в качестве двигателей и наоборот. Возможность двигателей работать в качестве генераторов и, следовательно, развивать тормозящий момент широко используется на практике.

Основным потребителем электрической энергии в электрической сети являются электрические двигатели. Электрическим двигателем называется такая электрическая машина, которая преобразует электрическую энергию в

механическую. они служат для приведения в движения станков, насосов, вентиляторов, конвейеров. в строительства они приводят в действие подъемные краны, перемещают бетон. немисливо ни одно производство, в котором отсутствовали бы электрические двигатели. наибольшее распространение получили асинхронные двигатели изобретенные в 1891г. великим русским электротехником м.о. доливо- добровольским . эти двигатели составляют не менее 95% всех электрических двигателей, применяемых в различных отраслях промышленности.

Большое распространения асинхронного двигателя получили потому что имеют преимущества перед другими типами двигателей;

1. Самая простая конструкция:
2. Высокая надежность в работе:
3. Низкая стоимость.

С развитием тиристорных преобразователей асинхронные двигатели все чаще применяются и для регулируемого электропривода. Наряду с весьма ценными качествами асинхронные двигатели имеют и недостатки, к числу которых прежде всего надо отнести:

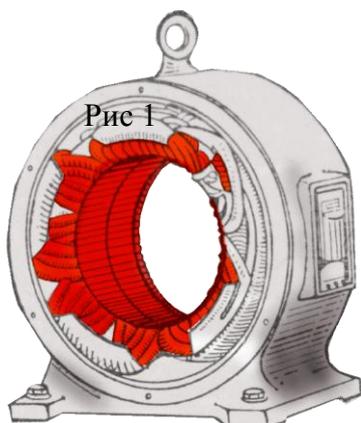
1. Плохие пусковые характеристики:
2. Влияние (отрицательное) на $\cos \phi$:
3. Трудность регулирования частоты вращения.

Асинхронные машины могут работать и как генераторы, но на практике это в настоящее время не применяется.

Мощности трехфазных асинхронных двигателей колеблются в широких пределах от долей ватта до нескольких тысяч кВт.

Двигатели мощностью до 0,5 кВт выполняют как трехфазными.

Основные части асинхронного двигателя: статор и ротор. статоры устроены одинаково: отличаются только конструкцией ротора. статор состоит из станины, которая отливается из стали, чугуна или алюминия. внутри вмонтирован сердечник, представляющий собой полый цилиндр и набранный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5мм, изолированных друг от друга лаком или другим изоляторами которые уменьшают потери на вихревые токи. листы имеют форму колец со штампованными пазами. в пазы, находящиеся на внутренней поверхности цилиндра укладывается обмотка, выполненная медным изолированным проводом круглого или прямоугольного сечения, реже из алюминиевого привода. обмотка статора состоит из трех отдельных частей называемых фазами. фазы обмоток могут быть соединены между собой звездой или треугольником.



обмотка статора служит для получения вращающегося магнитного поля машины.

рис.10.1

ротор состоит из сердечника цилиндрической формы, набранного из тонких отдельных дисков с пазами, и обмотки, расположенной в этих пазах.

в зависимости от конструкции обмотки ротора различают:

1. асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором:
 2. асинхронные двигатели с фазным ротором или контактными кольцами.
1. обмотка ротора короткозамкнутого двигателя выполняется медными неизолированными стержнями, уложенными в пазы. по обоим концам эти стержни замыкаются накоротко с помощью двух медных колец. двигатели с таким исполнением выпускаются мощностью более 100 квт. в менее мощных машинах пазы заливают алюминием. по обоим торцам ротора заодно отливаются алюминиевые кольца, замыкающие накоротко алюминиевые стержни. отливаются из алюминия такие и лопасти охлаждающего вентилятора. если такую обмотку представить отдельно от сердечника ротора, то она имеет вид беличьего колеса или беличьей клетки, отсюда и название- двигатель с беличьей клеткой.

При полюсном управлении двигателя к напряжению управления U_y подключается обмотка главных полюсов, к сети постоянного тока — обмотка якоря. Регулирование частоты вращения якоря производится также изменением напряжения управления, но в этом случае уже за счет изменения магнитного потока двигателя.

Вращающееся магнитное поле в простейшем случае может быть получено, если три обмотки, расположенные в пространстве под углом 120° друг от друга. питать симметричной трехфазной системой токов. В трехфазном асинхронном двигателе первое требование удовлетворяется соответствующим расположением катушек на сердечнике статора, а второе-подачей на катушки статора симметричной трехфазной системы напряжений. Построим график трехфазной системы токов и упрощенные картины магнитного поля для следующих моментов времени:

$$T=0; t_2=T/2; t_3=3/4T; t_5=T$$

Будем считать, что если ток на графике имеет положительный знак, то в катушке он направлен от начала фазы к её концу. В этом случае в проводах катушки, присоединенных к началу фазы ток в одном направлении, а на конце фазы в другом, т.е. “+” ,а “-“ . Из картинок рис8.6 видно , что за время соответствующее целому периоду поле делает один оборот. Если частота тока

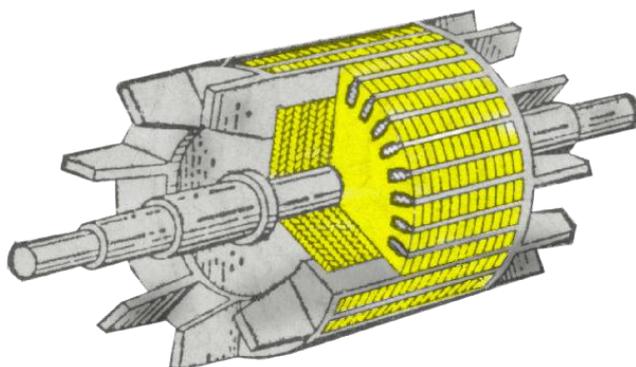


Рис 10.2

то за одну секунду магнитное поле повернется на n оборотов, а т.к. частота вращения измеряется числом оборотов в минуту, то $n=60 f_1$. где f_1 - частота вращения магнитного поля. Будем считать, что если ток на графике имеет положительный знак, то в катушке он направлен от начала фазы к её концу. В этом случае в проводах катушки, присоединенных к началу фазы ток в одном

направлении, а на конце фазы в другом, т.е. “+” ,а “-“ .

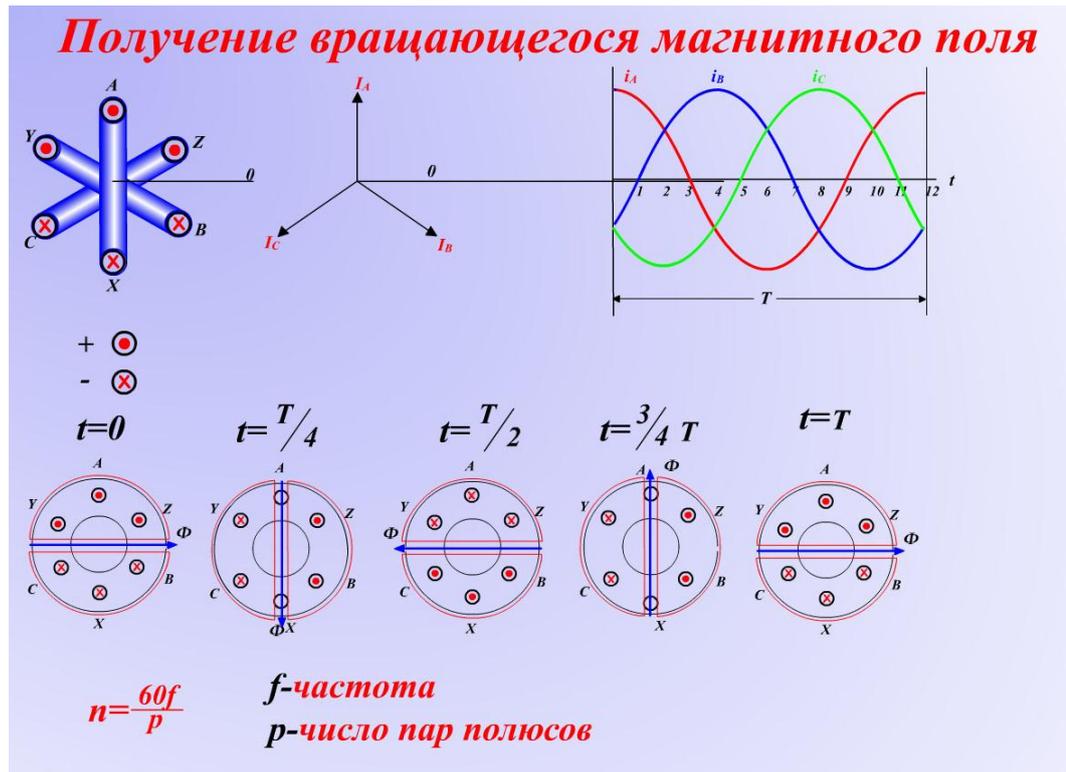


Рис.10.3

Будем считать, что если ток на графике имеет положительный знак, то в катушке он направлен от начала фазы к её концу. В этом случае в проводах катушки, присоединенных к началу фазы ток в одном направлении, а на конце фазы в другом, т.е. “+” ,а “-“ . Из картинок рис8.6 видно , что за время соответствующее целому периоду поле делает один оборот. Если частота тока f_1 , то за одну секунду магнитное поле повернется на n оборотов, а т.к. частота вращения измеряется числом оборотов в минуту, то $n=60 f_1$. где f_1 .- частота вращения магнитного поля.

Если на статоре имеется многополюсная обмотка, создающая $2p$ полюсов, то за один период T магнитное поле повернется на 360 электрических градусов или $1/p$ оборотов.

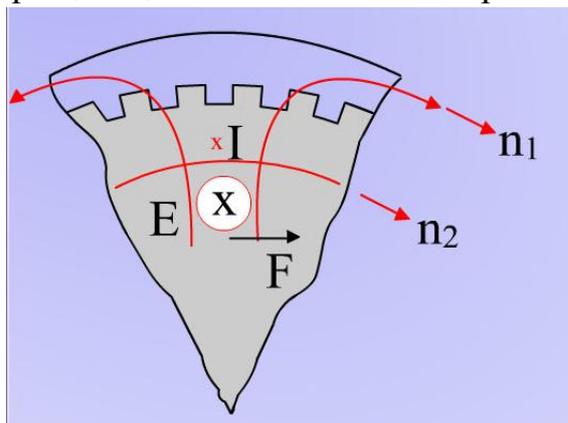
При частоте f поле повернется за одну секунду на $1/p f$ об/с следовательно, частота вращения магнитного поля будет

$$n = 60f/p$$

Частота вращения магнитного поля называется также синхронной частотой вращения. Число полюсов зависит от числа катушек фазы.

При подключении обмоток статора к трехфазной сети возникает вращающееся магнитное поле, которое будет пересекать обмотки ротора и наводить в них ЭДС E_2 , направление которой определяем по правилу правой руки. Так как обмотки ротора замкнуты накоротко, в них появляется ток i , направление которого совпадает с направлением ЭДС. Ток ротора, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем создает электромагнитную силу F . Направление силы определяем по правилу левой руки.

Сила направлена в сторону вращения магнитного поля. Произведение среднего значения всех сил в роторе на плечо $D_p/2$ определяет величину вращающегося момента асинхронного двигателя. Если этот момент



достаточен для преодоления момента сопротивления, то ротор начнет ускоренное движение в направлении вращения магнитного поля машины. По мере увеличения частоты вращения n_2 скорость пересечения проводников ротора магнитным полем $n_0 - n_2$ будет уменьшаться, будет уменьшаться ЭДС и ток ротора, а следовательно и вращающий момент. Если бы ротор,

увеличивая свою скорость, начал бы вращаться со скоростью поля, то скорость пересечения магнитным полем проводников ротора была бы равна нулю и не было бы ЭДС и тока в роторе, а следовательно и вращающего момента. Таким образом машина работает двигателем при $n_2 < n_0$. Частота вращения ротора не совпадает с частотой вращения магнитного поля, или ротор вращается не одновременно с магнитным полем, откуда происходит название двигателя – асинхронный (неодновременный).

1) скольжение.

Частота пересечения магнитным полем статора проводников ротора называется частотой скольжения- n_s

$$N_s = N_0 - N_2$$

отношение частоты скольжения к частоте вращения магнитного поля называется скольжением и обозначается s

$$s = n_s / n_0 = (n_0 - n_2) / n_0$$

Часто скольжение выражается в %

$$s \% = n_s / n_0 = (n_0 - n_2) / n_0 \cdot 100$$

При холостом ходе частота вращения ротора приближается к частоте

вращения магнитного поля, тогда

$$s = n_s / n_0 = (n_0 - n_2) / n_0 \rightarrow 0 \quad \text{т.к.} \quad n_2 \rightarrow n_0$$

Таким образом, скольжение асинхронных двигателей может приниматься от 1 до 0, т.е. $0 < s < 1$. При нормальной нагрузке скольжение асинхронных двигателей может быть от 1 до 6% в зависимости от мощности двигателя.

(1-2)% - для двигателей десяти кВт и выше;

(3-4)% - для двигателей 1-10 кВт.

(5-6)% - для двигателей меньше 1кВт

2) Частота вращения ротора.

Из формулы скольжения имеем:

$$n_2 = n_0(1 - s) = 60f/p(1 - s) = 3000/p(1 - s)$$

Выпускаемые нашей промышленностью двигатели общего применения серии А и АО имеют число пар полюсов от 1 до 4, а серии А2 и АО2 от 1 до 5.

Рассмотрим какой может быть частота вращения для двигателей средней мощности серии А2 и АО2 для которых $S=4\%$.

$$p=1; n_0=3000 \text{ об/мин}; n_2=3000(1-0.04)=2880 \text{ об/мин}$$

$$p=2; n_0=1500 \text{ об/мин}; n_2=1500(1-0.04)=1440 \text{ об/мин}$$

$$p=3; n_0=1000 \text{ об/мин}; n_2=1000(1-0.04)=960 \text{ об/мин}$$

$$p=4; n_0=750 \text{ об/мин}; n_2=750(1-0.04)=720 \text{ об/мин}$$

$$p=5; n_0=600 \text{ об/мин}; n_2=600(1-0.04)=576 \text{ об/мин}$$

Если двигатель большой мощности, то частота несколько выше и наоборот, двигатель небольшой мощности и частота ниже.

3) Частота тока в роторе

Вращающееся магнитное поле, пересекая проводники ротора с частотой скольжения n_s , наводит в ней ЭДС с частотой

$$f_2 = pn_s/60 = p(n_0 - n_2)/60 * n_0/n_0 = pn_0/60 * n_0 - n_2/n_0 = f_1 * s$$

При подвижном роторе частота тока в нем равна частоте тока статора $f_2 = f_1$

При идеальном холостом ходе $f_2 = 0$.

При нормальной работе скольжения асинхронного двигателя составляет (1-6)%, тогда частота тока в роторе будет составлять (0,5-3)Гц. При такой небольшой частоте тока в роторе потери в стали ротора очень малы и ими обычно пренебрегают.

4) ЭДС создаются во вращающейся и в неподвижной обмотках. Они индуктируются вследствие изменения потокосцепления основного вращающегося магнитного поля с неподвижными и подвижными контурами обмоток.

Вращающееся магнитное поле индуктирует в каждом витке обмотки статора ЭДС, действующее значение которой равно

$$E_1 = 4.44 \Phi f_1$$

А для всей обмотки

$$E_1 = 4.44 \Phi f_1 w_1 k_{y1}$$

Где w_1 - число витков обмотки ротора;

k_{y1} - обмоточный коэффициент, учитывающий не одновременность пересечения проводников обмотки статора магнитным полем.

ЭДС индуктируемая в подвижном роторе:

$$E_{2s} = 4.44 \Phi f_2 w_2 k_{y2} = 4.44 \Phi f_1 s w_2 k_{y2}$$

Где w_2 - число витков обмотки ротора;

k_{y2} - обмоточный коэффициент,

5) ток ротора и сдвиг фаз между ЭДС и током в роторе.

По закону Ома $I_2 = E_{2s}/Z_{2s}$, где Z_{2s} полное сопротивление. Оно меняется и зависит от скольжения

$$Z_{2s} = \sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}$$

Вращающий момент зависит от тока и магнитного потока. Для увеличения магнитного потока нужно увеличить габариты машины. Увеличение тока тоже не всегда целесообразно.

Эта формула вращающего момента неудобна для анализа.

$$M_{вр} = C_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

Нам нужно заменить величины Φ_m , I_2 , $\cos \psi_2$, т.к. нам их трудно измерит при вращении

$$E_1 = 4.44 \Phi_m f_1 w_1 k_{y1}, \text{отсюда}$$

$$\Phi_m = E_1 / 4.44 f_1 w_1 k_{y1}$$

$$I_2 = \frac{E_2 S}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}}$$

$$\text{т.к. } E_2 = \frac{E_1}{k}$$

$$I_2 = \frac{E_1 S}{k \sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}}$$

$$\cos \varphi = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}}$$

$$M_{врш} = C_2 \frac{E_1}{4.44 f \omega K_{y1} K} * \frac{E_1 S}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}} * \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}}$$

$$= \frac{C_2}{4.44 f \omega K_{y1} K} E_1^2 R_2 \frac{S}{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}$$

где C_2 - постоянная машина.

$$\frac{C_2}{4.44 f \omega K_{y1} K} = C$$

Пренебрегая падением напряжения в статоре и считая $E_1 \approx U_1$, получим Наибольший интерес представляют значения момента при скольжениях.

$$M_{вр} = C U_1^2 R_2 \frac{S}{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}$$

$$S=1 \Rightarrow M_{нук}$$

$$S_k = \frac{R_2}{X_2} \Rightarrow M_{max} \text{ критическое скольжение}$$

$$S=0 \Rightarrow M=0$$

- 1) $n_2 = 0; S = 1$ $M_{пуск} = CU_1^2 \frac{R^2}{R_2^2 + X_{2s}^2} \approx CU_1^2 \frac{1}{5X_2}$
- 2) $S_k = \frac{R_2}{X_2} = \frac{1}{5} = 0,2;$ $M_{max} = CU_1^2 \frac{1}{2X_2}$
- 3) $n_2 = n_1; S = 0$ $M_{вр} = 0$ $M_{пуск} = 40\% M_{max}$

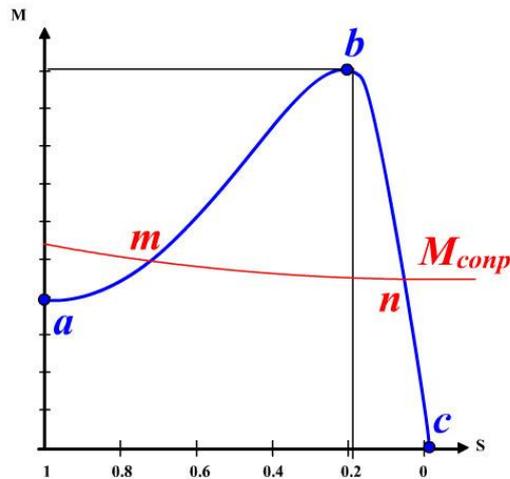


Рис 8

ав- зона неустойчивой работы,
вс- зона устойчивой работы.

При $M_{сопр} = M_{вр}$: $n = \text{const}$.

ЛЕКЦИЯ № 7

Основы электроники. Полупроводниковые приборы и их классификация

Если к р – n переходу подключить внешний источник напряжения U , то нарушится условие равновесия и начнет протекать ток. Если источник напряжения подключить знаком плюс к области р – типа, а знаком минус к области n – типа, то получим включение, которое называется **прямым** (рис. 2.2).

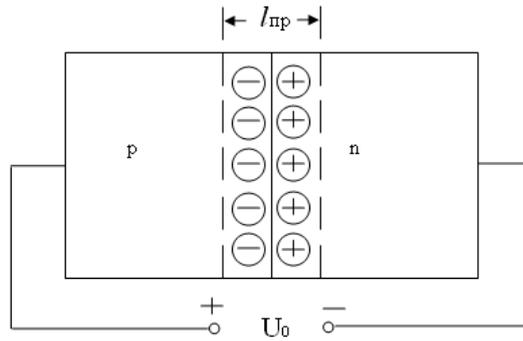


Рис. 2.2

Электрическое поле источника напряжения направлено навстречу контактному полю, поэтому напряженность результирующего поля в p - n - переходе уменьшится. Уменьшение напряженности поля вызывает снижение высоты потенциального барьера на значение напряжения источника питания: $U_k - U_0$. Нетрудно убедиться, что при этом уменьшается и ширина p - n - перехода.

Уменьшение высоты потенциального барьера приводит к тому, что увеличивается число переходов основных носителей заряда через p - n - переход, то есть усиливается диффузионный ток. В каждой области появляются избыточные концентрации неосновных носителей заряда – дырок в n -области, электронов в p -области. Процесс нагнетания неосновных носителей заряда в какую либо область полупроводника называется **инжекцией**.

Изменение диффузионного тока с изменением напряжения происходит по экспоненциальному закону:

$$I_{\text{диф}} = I_0 e^{qU_0/kT} \quad (2.1)$$

где I_0 – дрейфовый ток, или как его называют **обратный ток** p - n - перехода.

При прямом включении на обратный ток изменение высоты потенциального барьера не влияет, так как этот ток определяется только количеством неосновных носителей заряда, переносимых через p - n - переход в единицу времени в результате их хаотического теплового движения. Диффузионный и дрейфовый токи направлены в противоположные стороны, поэтому результирующий (прямой) ток через p - n - переход с учётом (2.1)

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{диф}} - I_0 = I_0 (e^{qU_0/kT} - 1). \quad (2.2)$$

Ток I_0 составляет десятки мкА в германиевых или нанометры в кремниевых $p-n$ - переходах, но сильно возрастает при увеличении температуры. Однако большая разница в величине I_0 определяется шириной запрещенной зоны.

В этом случае внешнее напряжение U_0 приложено знаком плюс к n - области (рис. 2.3).

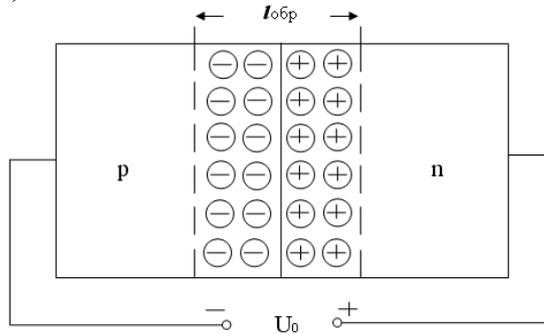


Рис. 2.3

Электрическое поле источника напряжения направлено в ту же сторону, что и контактное поле перехода. Поэтому высота потенциального барьера увеличивается и становится равной $U_K + U_0$. Увеличение обратного смещения приводит к расширению $p-n$ - перехода ($l_{np} < l_{обp}$). Для практических расчетов удобно использовать следующую формулу:

$$l = l_0 \sqrt{\frac{U_0}{U_K}}, \quad (2.3)$$

где $l_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} U_K \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}$ - ширина $p-n$ - перехода в отсутствии внешнего поля. Здесь ϵ - относительная диэлектрическая постоянная полупроводника, ϵ_0 - электрическая постоянная.

Увеличение потенциального барьера приводит к снижению диффузионного тока. Изменение диффузионного тока происходит по экспоненциальному закону

$$I_{диф} = I_0 e^{-qU_0/kT}. \quad (2.4)$$

Поскольку дрейфовый ток не зависит от высоты потенциального барьера и равен I_0 , то результирующий ток через $p-n$ - переход

$$I_{OBR} = I_0 e^{-qU_0/kT} - I_0 = I_0 (e^{-qU_0/kT} - 1). \quad (2.5)$$

При обратном включении происходит извлечение (экстракция) неосновных носителей из контактирующих полупроводников. Поэтому обратный ток называется **током экстракции**.

ВАХ называют зависимость тока через $p-n$ - переход от приложенного к нему напряжения $I=f(U)$. На основании (2.2) и (2.5) в самом общем виде она представляется экспоненциальной зависимостью (рис. 2.4 а)

$$I = I_0 \left(e^{\pm qU_0/kT} - 1 \right). \quad (2.6)$$

Если $p-n$ - переход включен в прямом направлении, напряжение U_0 будет со знаком плюс, если в обратном – со знаком минус. При $U_{np} \geq 0,1$ В можно пренебречь единицей по сравнению с экспоненциальным членом и прямой ток растет с повышением напряжения экспоненциально. При обратном включении обратный ток достигает значения $-I_0$ уже при напряжениях порядка $-0,2$ В и далее, с ростом напряжения не изменяется. Величина I_0 носит поэтому, название тока насыщения обратного включенного $p-n$ - перехода.

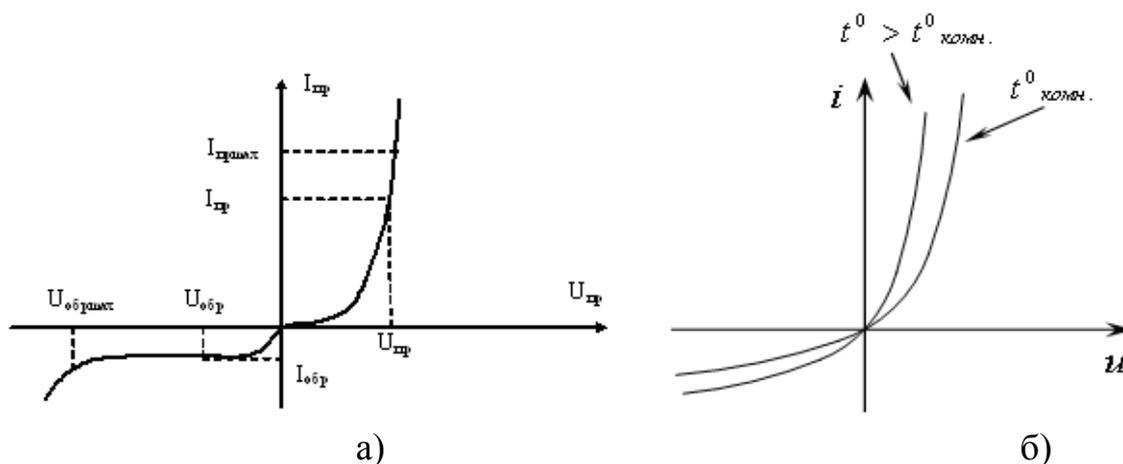


Рис. 2.4

Обратный ток на несколько порядков меньше прямого, то есть $p-n$ - переход хорошо проводит ток в прямом направлении и плохо – в обратном. Следовательно, $p-n$ - переход характеризуется выпрямляющим действием, что позволяет использовать его в качестве выпрямителя переменного тока.

Наклон прямой ветви ВАХ возрастает с ростом температуры (рис. 2.4. б), несмотря на то, что экспоненциальный член $e^{qU_0/kT}$ с ростом температуры уменьшается. Это обусловлено более сильной положительной температурной зависимостью I_0 . В результате при прямых напряжениях с повышением температуры ток возрастает. На практике влияние температуры на ВАХ $p-n$ - перехода оценивается параметром, который называется **температурным коэффициентом напряжения (ТКН)**. Для определения ТКН, изменяя температуру,

измеряют изменение напряжения на $p-n$ - переходе при постоянном токе. Обычно ТКН имеет отрицательный знак, то есть с ростом температуры напряжение на переходе уменьшается. Для $p-n$ - переходов из кремния ТКН составляет порядка 3 мВ/град.

Уравнение (2.6) описывает ВАХ идеализированного $p-n$ - перехода. Считается, что в таком переходе объемное сопротивление p - и n - областей равно нулю, а при протекании тока в самом $p-n$ - переходе не имеют место процессы рекомбинация. В реальном переходе сопротивление баз обычно составляет десятки Ом. Поэтому в формулу (2.6) вносится поправка, учитывающая различие напряжения на самом $p-n$ - переходе и внешним напряжением U_0 . С учетом этой поправки получим

$$I = I_0 \left(e^{q(U_0 - r_B I) / kT} \right) \quad (2.7)$$

Емкости $p-n$ - перехода. При низких частотах ток $p-n$ - перехода определяется только активными сопротивлениями электронно–дырочного перехода, а также p - и n - областей полупроводника (r_B). При работе $p-n$ - перехода на высоких частотах его инерционность во многом определяется его емкостью. Обычно учитываются две основные емкости $p-n$ - перехода: диффузионная и барьерная.

При прямом включении $p-n$ - перехода в смежные области инжектируются неосновные носители. Вследствие этого в тонких слоях около границы $p-n$ - перехода появляются равные по значению и противоположного знака избыточные заряды неравновесных неосновных носителей $Q_{дф}$. При изменении напряжения изменяется число инжектированных носителей, а следовательно, и заряд. Это изменение, вызванное приложенным напряжением, подобно изменению зарядов на обкладках конденсатора. Поскольку неосновные носители заряда попадают в базу за счет диффузии, то эту емкость называют *диффузионной* и рассчитывают по формуле

$$C_{дф} = \frac{qI\tau}{kT}. \quad (2.8)$$

Из (2.8) следует, что диффузионная емкость будет тем больше, чем больше ток I через $p-n$ - переход и чем больше время жизни носителей в базах τ .

Электронно–дырочный переход, представляющий собой двойной электрический слой, подобен заряженному конденсатору. Емкость перехода определяется площадью перехода S , его шириной и диэлектрической постоянной полупроводника. Емкость перехода называется *барьерной* и определяется следующим выражением

$$C_{B0} = S \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon q N_d}{2U_K \left(1 + \frac{N_d}{N_a}\right)}}. \quad (2.9)$$

Если к переходу приложено напряжение, то его емкость изменяется, поскольку при этом изменяется ширина перехода. Зависимость емкости от значения приложенного напряжения U имеет вид

$$C_B = C_{B0} \sqrt{\frac{U_K}{U_K \pm U}}. \quad (2.10)$$

Знак минус берется в случае прямого включения перехода, знак плюс – в случае обратного включения. Поскольку C_B зависит от приложенного напряжения, то $p-n$ - переход можно использовать в качестве конденсатора переменной емкости.

При прямом напряжении диффузионная емкость значительно больше барьерной, а при обратном напряжении – наоборот. Поэтому при прямом напряжении инерционность $p-n$ - перехода определяется диффузионной емкостью, а при обратном – барьерной емкостью.

Как отмечалось выше, при не очень больших обратных напряжениях ток I_0 невелик. Когда обратное напряжение достигает некоторого порогового значения $U_{ПОР}$, обратный ток резко возрастает. Наступает так называемый электрический пробой перехода.

Все разновидности пробоя перехода разделяются на две группы: электрические и тепловой. Различают два механизма электрического пробоя – лавинный и туннельный пробой.

Лавинный пробой возникает в относительно широких $p-n$ - переходах. В таком переходе при обратном напряжении электроны и дырки приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации, в результате которой рождаются дополнительные электронно–дырочные пары. Каждый компонент этой пары, в свою очередь, ускоряясь в электрическом поле, может родить новую пару и т.д. Ток перехода, вследствие такого лавинного размножения носителей резко возрастает.

В полупроводниках с узким $p-n$ - переходом возникает **туннельный пробой**, связанный с туннельным эффектом. При $U_{ОБР} \geq U_{ПОР}$ появляется возможность перехода носителей заряда из одной области в другую без затраты энергии (туннельный эффект). С дальнейшим ростом $U_{ОБР}$ все большее число зарядов совершает туннельные переходы и обратный ток резко возрастает.

Тепловой пробой $p-n$ - перехода возникает вследствие перегрева перехода проходящим через него обратным током при недостаточном теплоотводе. Обратный ток, являясь тепловым, резко возрастает, а перегрев увеличивается. Это приводит к лавинообразному увеличению тока, в результате чего возникает тепловой пробой $p-n$ - перехода и выход его из строя.

Диодом называют электропреобразовательный прибор, который, как правило, содержит один или несколько электрических переходов и два вывода для подключения к внешней цепи. В справочниках по полупроводниковым приборам диоды классифицируются по применению в радиоэлектронной аппаратуре или по назначению.

Варикап предназначен для использования в качестве электрически управляемой емкости. Принцип работы варикапа основан на использовании зависимости барьерной емкости электрического перехода от обратного напряжения.

Основное применение варикапов – электронная перестройка частоты колебательных контуров. Существует несколько разновидностей варикапов. Так, параметрические диоды используются для усиления и генерации СВЧ – сигналов, а умножительные применяются в умножителях частоты с широким диапазоном частот.

Туннельным диодом называют полупроводниковый прибор, сконструированный на основе вырожденного полупроводника, в котором при обратном и небольшом прямом напряжении возникает туннельный эффект и вольт–амперная характеристика имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Устройство туннельных диодов в принципе не отличается от устройства других диодов, но для их изготовления применяют полупроводниковые материалы с содержанием примеси до 10^{20} см^{-3} .

В случае нелинейной ВАХ каждый малый ее участок рассматривается как отрезок прямой линии и вводится дифференциальное сопротивление в данной точке характеристики

$R_i = \frac{dU}{dI}$. Если характеристика имеет падающий участок, то на этом участке R_i отрицательно.

ВАХ туннельного диода приведена на рис. 3.2. Участок АВ характеризуется отрицательным дифференциальным сопротивлением. Если включить туннельный диод в контур электрической цепи, то при определенных соотношениях между параметрами контура и величиной отрицательного сопротивления в этой цепи возможны усиление или генерация колебаний. Туннельные диоды используют в основном для построения СВЧ генераторов в диапазоне 3-30 ГГц, а также специализированных вычислительных устройств и логических сверхбыстродействующих схем.

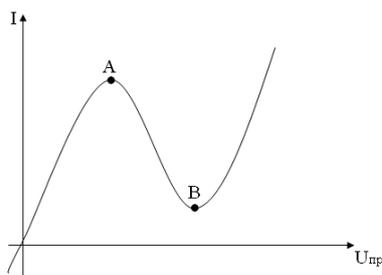


Рис. 3.2.

Одной из разновидностей генераторных диодов является **лавиннопролетный диод (ЛПД)**. На его ВАХ при лавинном пробое *p-n*-перехода на высоких частотах возникает участок с отрицательным сопротивлением. Если ЛПД поместить в резонатор, то в нем возникают незатухающие колебания с частотой до 100 ГГц. Выходная мощность колебаний может достигать 10 Вт (при $f=1$ ГГц). Коэффициент полезного действия ЛПД достигает 30-50 %.

Другой разновидностью генераторных диодов является **диод Ганна**, который представляет собой пластинку однородного полупроводника (без *p-n*- перехода) длиной 10^{-2} - 10^{-3} см. На торцевые части пластинки нанесены металлические контакты, называемые катодом К и анодом А. Для изготовления диодов Ганна используются интерметаллические соединения GaAs, InSb, InAs и InP с проводимостью *n*-типа. Диод включают в колебательный контур. При приложении к контактам постоянного напряжения, создающего электрическое поле с напряженностью около $3 \cdot 10^3$ В/см в диоде Ганна возникают электрические колебания с частотой до 60 ГГц. Мощность колебания может достигать 10 – 15 Вт, а КПД достигает 10-12 %.

ЛЕКЦИЯ № 8

Фотоэлектрические и оптоэлектронные приборы. Выпрямители и преобразователи частоты.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного напряжения источников питания в постоянное. Основное свойство выпрямительных диодов – односторонняя проводимость, наличие которой определяет эффект выпрямления.

Частотный диапазон использования выпрямительных диодов очень широк. Поэтому диоды классифицируют по диапазону рабочих частот.

Выпрямительные низкочастотные диоды (НЧ диоды) предназначены для преобразования переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в постоянный. Главное требование, предъявляемое к НЧ диодам, – это получение больших величин выпрямленных токов. Выпрямительные диоды обычно подразделяются на диоды малой, средней и большой мощности, рассчитанные на выпрямленный ток до 0,3 А, от 0,3 до 10 А и свыше 10 А соответственно. НЧ диоды характеризуются большой площадью *p-n* переходов.

Выпрямительные высокочастотные диоды (ВЧ диоды) предназначены для нелинейного электрического преобразования сигналов на частотах до десятков и сотен мегагерц. ВЧ диоды используются в детекторах высокочастотных сигналов, смесителях, схемах преобразователей частоты и т.п. Высокочастотные диоды

малоинерционны, т.к. содержат точечный $p-n$ - переход малой площади и потому их барьерная емкость составляет доли пикофарады.

Диоды с барьером Шоттки распространены в переключательных источниках питания, так как позволяют увеличить рабочую частоту переключения до 100 кГц и более, уменьшить массогабаритные характеристики РЭА и повысить КПД источников питания. Потенциальный барьер Шоттки создается при контакте металла с полупроводником. В качестве материала полупроводника чаще всего используют кремний n -типа, а в качестве металла – Al, Au, Mo и др. При этом исходят из того, что работа выхода металла должна быть больше работы выхода кремния. В таких диодах диффузионная емкость равна нулю, а барьерная емкость не превышает 1 пФ.

Стабилитроны - это полупроводниковые диоды, принцип работы которых основан на том, что при обратном напряжении на $p-n$ -переходе в области электрического пробоя напряжение на нем изменяется незначительно при значительном изменении тока. Условное обозначение стабилитрона приведено на рис. 3.1 б. Стабилитрон предназначен для стабилизации напряжения в схемах.

Основным электрическим параметром стабилитрона является напряжение стабилизации U_{CT} , которое остается практически постоянным при изменении тока в широких пределах от $I_{CT.min}$ до $I_{CT.max}$ (рис. 3.1 а).

Рабочий участок ВАХ стабилитрона находится в области электрического пробоя. Напряжение стабилизации зависит от ширины $p-n$ - перехода, которая определяется концентрацией примесей в базах диода. Если используется исходный полупроводник с высокой концентрацией примеси, то $p-n$ - переход будет узким и наблюдается туннельный пробой. Рабочее напряжение не превышает 3-4 В.

Высоковольтные стабилитроны должны иметь большую ширину $p-n$ - перехода, поэтому их делают на основе слаболегированного кремния. В них происходит лавинный пробой, а напряжение стабилизации более 7 В. При U_{CT} от 3 до 7 В работают оба механизма пробоя. Промышленность выпускает стабилитроны с напряжением стабилизации от 3 до 400 В.

Динамическое (дифференциальное) сопротивление стабилитрона в области электрического пробоя r_D характеризует степень стабилизации. Значение этого сопротивления определяется отношением малого изменения напряжения на диоде к соответствующему изменению тока диода при заданном начальном значении этого тока (рис. 3.1. а). Чем меньше r_D , тем лучше стабилизация.

$$r_D = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}$$

Важным параметром стабилитронов является температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН). ТКН – это относительное изменение напряжения стабилизации при изменении температуры на один градус.

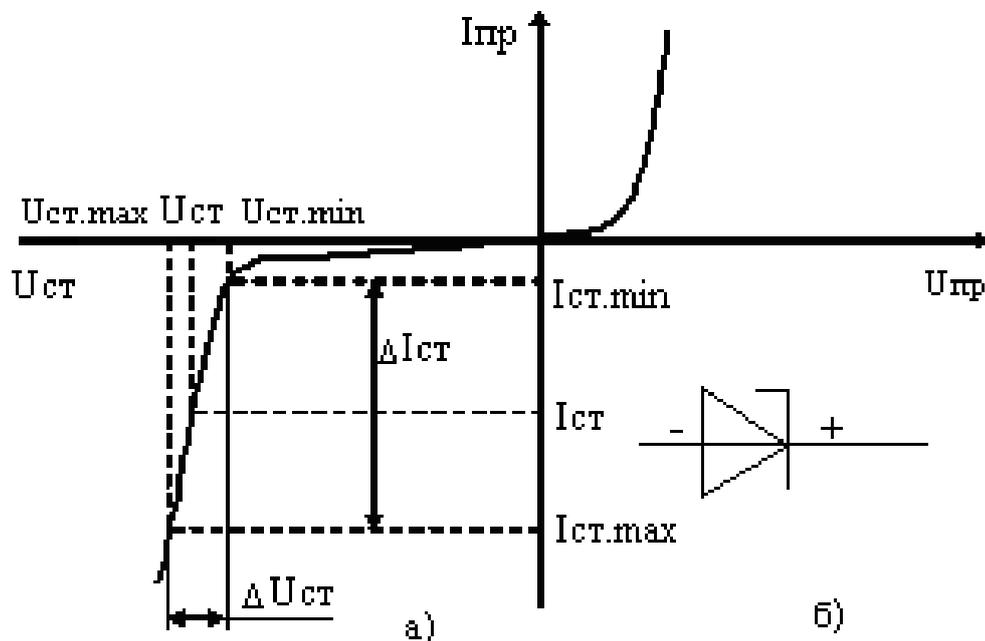


Рис. 3.1.

Низковольтные стабилитроны, где наблюдается туннельный пробой, имеют отрицательный, а высоковольтные диоды, где наблюдается лавинный пробой, - положительный ТКН. Типовые значения ТКН обычно составляют не более 0,2 -0,4 %/град.

Оптоэлектроника – раздел электроники, изучающий теорию и практическое применение устройств, в которых прием, передача и обработка информации происходит путем преобразования световых сигналов в электрические и наоборот. Элементами оптоэлектроники являются фотодиод и светодиод.

Фотодиодом называется фотоэлектрический прибор с одним $p-n$ -переходом. Фотодиод может включаться в схему как с внешним источником питания (фотодиодный режим), так и без него. Внешний источник питания подключается таким образом, что $p-n$ - переход оказался при обратном смещении. В отсутствие освещения через диод протекает «темновой» ток экстракции I_0 очень малой величины, не зависящий от приложенного напряжения. При освещении n -базы диода светом, содержащем фотоны с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны, происходит генерация электронно-дырочных пар. Если пары образуются на расстоянии от перехода не превышающем диффузионной длины, то генерированные светом дырки будут экстрагироваться электрическим полем перехода, и обратный ток возрастает по сравнению с его «темновым» значением. Чем интенсивнее

световой поток Φ , тем выше значение обратного тока диода I_{ϕ} . На рис. 3.3 приведена ВАХ фотодиода

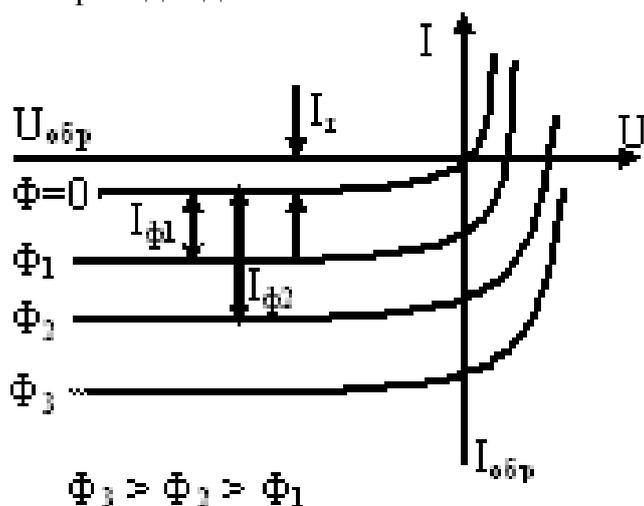


Рис. 3.3.

для различных значений светового потока. В широких пределах уровней освещенности фототок зависит от светового потока практически линейно.

Коэффициент пропорциональности $K_{\phi} = \frac{dI_{\phi}}{d\Phi}$ составляет несколько мА/лм и называется **чувствительностью фотодиода**. Фотодиоды используются в качестве приемников светового потока в различных измерительных устройствах, а также в волоконно – оптических линиях связи.

Кроме фотодиодного режима, широко используется вентильный (фотовольтаический) режим работы фотодиода. В этом режиме фотодиод работает без подключения внешнего источника питания и служит для непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую. При освещении диода в вентильном режиме на его выводах возникает вентильное напряжение. Фотодиод в этом случае называют **солнечным преобразователем**. Электрически соединенные между собой преобразователи - батареи применяются в качестве источников электрической энергии для питания РЭА в космических аппаратах и наземных установках.

Светодиоды – это излучающие полупроводниковые приборы с одним *p-n*- переходом, преобразующие электрическую энергию в некогерентное световое излучение. Излучение появляется в результате рекомбинации пар: электрон – дырка. Рекомбинация наблюдается, если *p-n*- переход включен в прямом направлении. Рекомбинация будет излучательной не всегда, и происходит она в так называемых прямозонных полупроводниках, типичным представителем которых

является арсенид галлия. Такие полупроводники имеют специфическую зонную диаграмму.

Длина волны λ излучаемого света однозначно определяется энергией кванта, которая при излучательной рекомбинации приблизительно равна ширине запрещенной зоны полупроводника. Для светодиодов, изготовленных из арсенида галлия, $\lambda = 0,9-1,4$ мкм. Диоды красного, желтого и зеленого свечения изготавливают на основе фосфида галлия, с фиолетовым свечением – на основе карбида кремния и т.д.

Энергетической характеристикой светодиодов является **квантовый выход** (эффективность), который показывает, сколько квантов излучения на выходе светодиода возникает на каждый электрон, проходящий по цепи управления. Квантовый выход для современных светодиодов обычно составляет 0,01-0,04, у светодиодов с гетеропереходом, для создания которого использованы двойные и тройные полупроводниковые соединения, он значительно больше (до 0,3), но всегда меньше единицы. Вольт – амперная характеристика, как и в обычных диодах, описывается экспоненциальной зависимостью. Светодиод переключается за $10^{-7}-10^{-9}$ с., то есть является быстродействующим источником света.

Светодиоды используют в оптических линиях связи, индикаторных устройствах, оптопарах и т.д.

Оптоэлектронная пара, или **оптопара**, содержит светоизлучатель и фотоприемник конструктивно связанные через оптическую среду. Прямая оптическая связь от излучателя к фотоприёмнику исключает все виды электрической связи между этими элементами.

Под действием входного электрического сигнала светодиод генерирует световое излучение, а фотоприемник (фотодиод, фоторезистор и т.п.) генерирует ток под действием освещения.

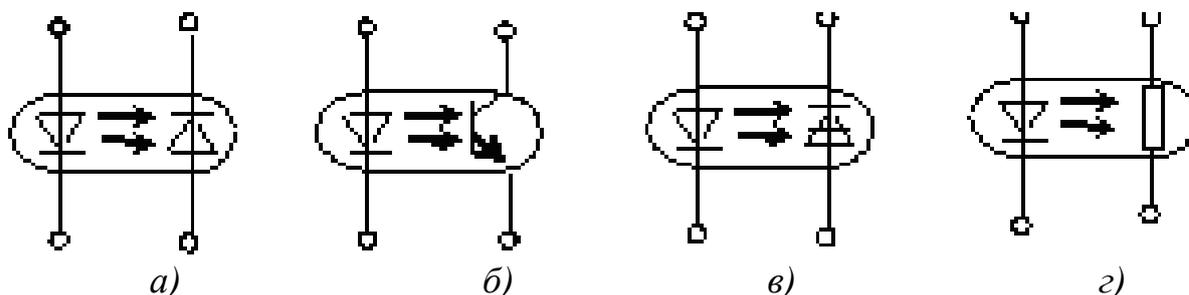


Рис. 3.4.

На рис. 3.4. приведено схемное изображение оптопары, состоящей из светодиода и фотодиода (а), фототранзистора (б), фототиристора (в), фоторезистора (г). Оптопара используется как элемент электрической развязки в цифровых и импульсных устройствах, устройствах передачи аналоговых сигналов, системах автоматики для бесконтактного управления высоковольтными источниками питания и др.

Управляющее действие напряжения на затворе $U_{ЗИ}$ на ток стока I_C определяется по **стокзатворной** или, как ее еще называют **передаточной характеристикой** транзистора. На рис. 5.3 а показано семейство стокзатворной характеристики $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$.

Из стокзатворной характеристики видно, что при $U_{ЗИ} = 0$ через транзистор протекает максимально возможный ток стока. С ростом $U_{ЗИ}$ сечение канала падает и при некотором $U_{ЗИ} = U_{ЗИ.ОТС}$ оно становится равным нулю и ток I_C становится практически равным нулю. Транзистор закрывается. С ростом $U_{СИ}$ характеристика становится несколько круче, что обусловлено незначительным уменьшением длины канала. Уравнение стокзатворной характеристики имеет вид

$$I_C = I_{C.НАС} \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ.ОТС}}\right)^2. \quad (5.2)$$

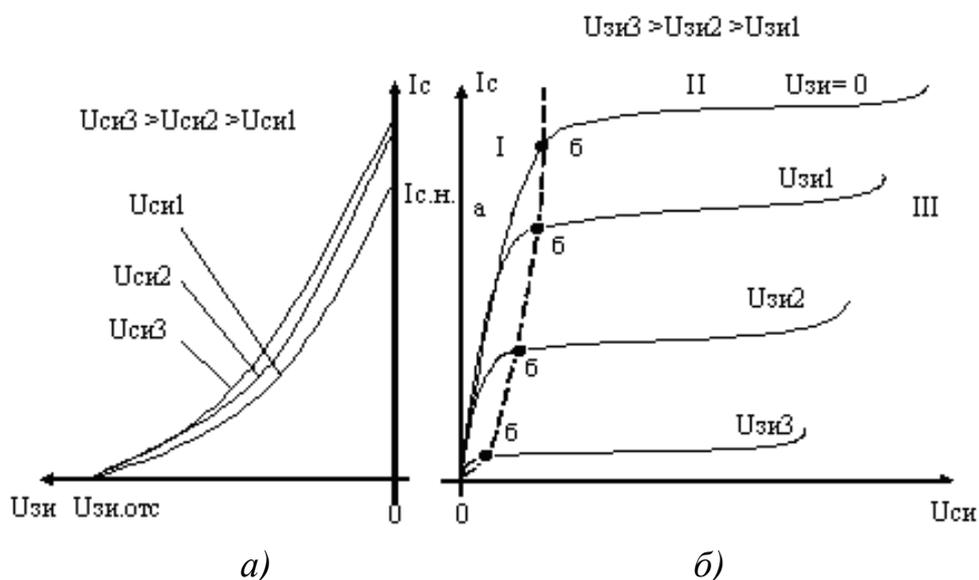


Рис. 5.3.

На рис. 5.3 б изображены выходные (стокзатворные) характеристики полевого транзистора. **Стокзатворные характеристики** – это зависимость

$I_C = f(U_{СИ})$ при фиксированных значениях $U_{ЗИ} = \text{const}$. С повышением $U_{СИ}$ ток I_C увеличивается почти прямолинейно (режим плавного канала) и при достижении $U_{СИ} = U_{СИ.НАС}$ (точка б) рост I_C прекращается.

Одним из основных параметров любого типа полевого транзистора является **крутизна**

$$S = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \quad (\text{мА/В}),$$

которую можно рассчитать по формуле

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{U_{3И}}{U_{3И.ОТС}}\right), \quad (5.3)$$

где S_{\max} –максимальная крутизна, имеющая место при $U_{3И}=0$. Из (5.2) (5.3) следует, что при увеличении $U_{3И}$ ток стока и крутизна полевого транзистора уменьшается.

По статическим характеристикам можно определить и другие параметры полевого транзистора.

Дифференциальное (внутреннее) сопротивление транзистора характеризует сопротивление канала между истоком и стоком.

$$R_i = \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \quad \text{при } U_{3И} = \text{const} \quad (5.4)$$

В режиме насыщения (пологая часть ВАХ) R_i составляет несколько МОм и практически не зависит от $U_{СИ}$.

Коэффициент усиления по напряжению характеризует усилительные свойства транзистора:

$$\mu = - \frac{dU_{СИ}}{dU_{3И}} \quad \text{при } I_C = \text{const} \quad (5.5)$$

Этот коэффициент показывает во сколько раз напряжение на стоке сильнее влияет на ток стока, чем напряжение на затворе. Знак «минус» указывает на то, что направления изменений напряжения противоположны. Поскольку не всегда имеется возможность определить коэффициент усиления по характеристикам, его можно вычислить, исходя из следующего уравнения

$$\mu = SR_i. \quad (5.6)$$

В отличие от полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом в МДП-транзисторах металлический затвор изолирован от полупроводниковой области, образующей канал, слоем диэлектрика. По этой причине МДП-транзисторы относятся к полевым транзисторам с изолированным затвором. Слой диэлектрика представляет собой окисел диэлектрика SiO_2 , отсюда другое их название - МОП-транзисторы (структура металл – окись - полупроводник).

Принцип действия МДП – транзисторов основан на эффекте изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием поперечного электрического поля. Приповерхностный слой полупроводника и является токопроводящим каналом этих транзисторов.

Структура МДП-транзистора с индуцированным p -каналом показана на рис. 5.4 а, а условные обозначения на рис. 5.4 б.

Транзистор имеет выводы: вывод от истока – И, вывод от стока – С, вывод от затвора – З и вывод от кристалла, называемого подложкой – П.

Так как p^+ -области стока и истока с полупроводником n -типа образуют два p - n - перехода, то при любой полярности напряжения $U_{СИ}$ один из этих переходов оказывается включенным в обратном направлении и ток стока I_C практически равен нулю.

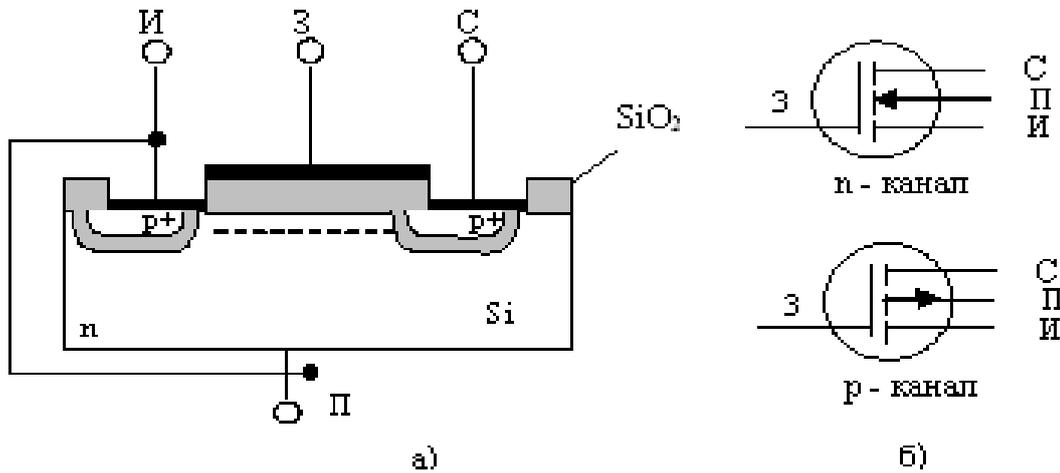


Рис. 5.4.

Для образования в транзисторе токопроводящего канала на затвор подаётся напряжение отрицательной полярности. Электрическое поле затвора через слой диэлектрика SiO_2 проникает в приповерхностный слой полупроводника, выталкивает из него основные носители заряда (электроны) и притягивает неосновные носители (дырки). Происходит обеднение приповерхностного слоя электронами и обогащение его дырками. При некотором напряжении на затворе $U_{ЗИ} > U_0$, называемом **пороговым** $U_{ЗИ,пор}$, в слое происходит смена электропроводности с электронной на дырочную и формируется канал p – типа, соединяющий исток со стоком. С ростом $U_{ЗИ}$ приповерхностный слой обогащается

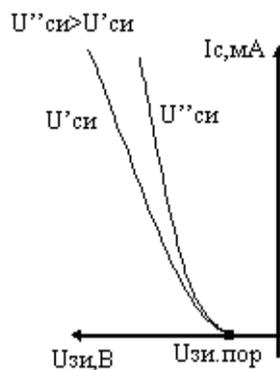


Рис. 5.5

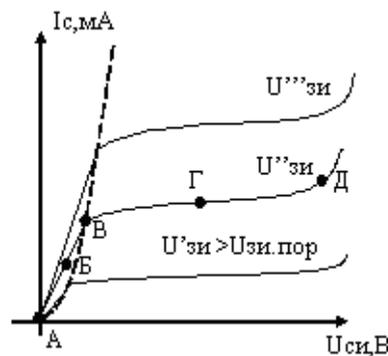


Рис. 5.6

дырками, что приводит к уменьшению сопротивления канала. Ток стока I_C при этом увеличивается. На рис. 5.5 приведена стоко – затворная ВАХ для МДП – транзистора с индуцированным p – каналом.

На рис. 5.6 приведены выходные (стоковые) характеристики для МДП-транзисторов с индуцированным n -каналом. При заданном напряжении на затворе по мере увеличения $|U_{СИ}|$ ток стока от нулевого значения возрастает сначала почти линейно (область крутой части ВАХ), затем скорость его возрастания уменьшается и при достаточно больших значениях $|U_{СИ}|$ ток стремится к постоянной величине. Прекращение возрастания тока связано с перекрытием канала вблизи стока.

На рис. 5.7 показаны структура МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа (а) и условные графические изображения таких транзисторов (б).

Если при $U_{ЗИ} = 0$ приложить напряжение, то через канал потечет ток электронов. При подаче на затвор напряжения, отрицательного относительно истока, в канале создаётся поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны выталкиваются из канала. Канал обедняется электронами, сопротивление его увеличивается, и ток стока уменьшается. Чем больше отрицательное напряжение затвора, тем меньше этот ток. Такой режим транзистора называют **режимом обеднения**.

Если же на затвор подать положительное напряжение, то под действием поля, созданного этим напряжением, из областей истока и стока, а также из кристалла в канал будут приходить электроны, его проводимость будет увеличиваться, и ток стока возрастает. Этот режим называют **режимом обогащения**.

Рассмотренные процессы иллюстрируются статической стоко – затворной характеристикой $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$, приведенной на рис. 5.8 а.

При $U_{ЗИ} > 0$ транзистор работает в режиме обогащения, а при $U_{ЗИ} < 0$ - в режиме обеднения.

Стоковые характеристики (рис. 5.8 б) в режиме обогащения проходят выше начальной, снятой при $U_{ЗИ} = 0$, а в режиме обеднения – ниже начальной.

Статические дифференциальные параметры S , R_i и μ так же как и для полевых транзисторов с управляющим p - n - переходом рассчитываются по формулам (5.4), (5.5) и (5.6) соответственно.

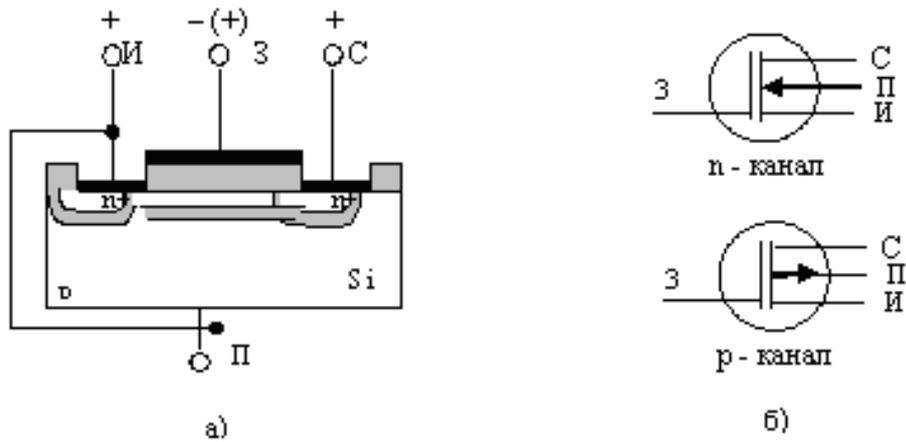


Рис. 5.7.

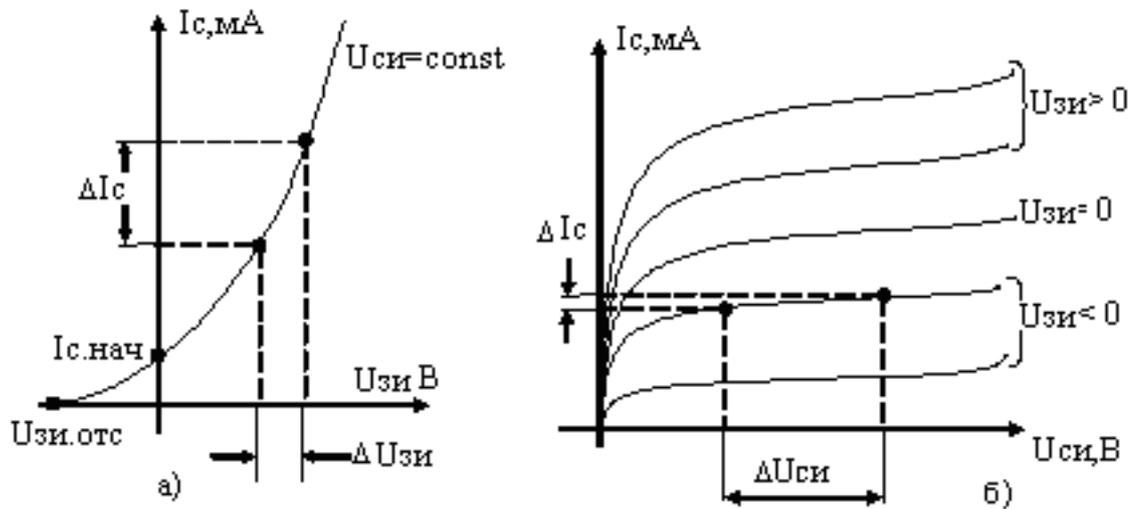


Рис. 5.8.

Крутизна и внутреннее сопротивление имеют примерно одинаковый порядок для всех типов полевых транзисторов. Что же касается входного сопротивления и межэлектродных емкостей, то МДП-транзисторы имеют лучшие показатели, чем транзисторы с управляющим $p-n$ - переходом. Так входное сопротивление $R_{зи}$ у них на несколько порядков выше и составляет $10^{12}-10^{15}$ Ом. Значения межэлектродных емкостей не превышает: для $C_{зи}$, $C_{си}$ - 10 пФ, для $C_{зс}$ - 2 пФ. Последние определяют инерционность транзистора.

ЛЕКЦИЯ № 9

Микропроцессоры. Состав, назначение элементов и работа микропроцессора

Интегральные микросхемы представляют собой качественно новый тип электронных приборов и являются основной элементной базой электронных устройств.

Интегральная микросхема (ИМС) – это совокупность электрически связанных между собой электрорадиоэлементов (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле, то есть одновременно, на одной и той же несущей конструкции (подложке), и выполняющая определенную функцию преобразования информации.

Основная особенность ИМС состоит в том, что она выполняет сложную функцию и может быть усилителем, триггером, счетчиком, запоминающим устройством и др., тогда как для выполнения той же функции на дискретных элементах требуется собрать соответствующую схему.

Для ИМС присущи два основных признака: **конструктивный** и **технологический**. Конструктивный признак заключается в том, что элементы ИМС, расположенные внутри или на поверхности общей подложки, электрически соединенные и заключенные в общий корпус, представляют собой неразделимое целое. Все или часть элементов и межэлементных соединений ИМС создают в едином технологическом цикле. Отсюда высокая надежность и низкая стоимость интегральных микросхем.

В настоящее время по способу изготовления и получаемой при этом структуре различают три принципиально разных типа ИМС: **полупроводниковые, пленочные** и **гибридные**. Каждый тип ИМС отличается конструкцией, степенью интеграции, характеризующей количество элементов и компонентов, входящих в состав микросхемы.

Элементом называют часть ИМС, реализующую функции какого – либо электрорадиоэлемента (транзистор, диод, резистор, конденсатор и др.), которая выполнена конструктивно неотделима от кристалла или подложки.

Компонентом ИМС называется та ее часть, которая выполняет функцию дискретного элемента, но перед монтажом является самостоятельным изделием.

Одним из главных конструктивных признаков ИМС считают **тип подложки**. По этому признаку ИМС можно разделить на два типа: ИМС на полупроводниковых и диэлектрических подложках.

Среди полупроводниковых материалов в качестве подложек используются кремний и арсенид галлия. Часть или все элементы ИМС расположены внутри самой подложки, выполненной в виде полупроводниковой монокристаллической пластины.

В ИМС с диэлектрической подложкой элементы размещаются на ее поверхности. Основное преимущество микросхем с полупроводниковой подложкой – очень большая степень интеграции элементов, но с ограниченным диапазоном номинальных значений их параметров и необходимость их изоляции друг от друга. Основные преимущества микросхем с диэлектрической подложкой – очень хорошая изоляция элементов, стабильность их свойств, а также

возможность более широкого выбора типа элементов и их электрических параметров.

Пленочная ИС – это микросхема, элементы которой выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность диэлектрической подложки. Пленки создают путем осаждения при низких давлениях различных материалов в виде тонких пленок.

В зависимости от способа нанесения пленки и связанной с этим их толщиной различают **тонкопленочные ИС** (толщина пленки до 1 – 2 мкм) и **толстопленочные ИС** (толщина пленок от 10 – 20 мкм и выше).

В настоящее время не существует стабильных пленочных диодов и транзисторов, поэтому пленочные ИС содержат только пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и т.п.).

Гибридная ИС (или ГИС) – это микросхема, которая представляет собой комбинацию пленочных пассивных элементов и дискретных активных элементов, расположенных на общей диэлектрической подложке. Дискретные компоненты называют навесными. Активные элементы для гибридных ИМС являются бескорпусными, либо в миниатюрных металлических корпусах.

Основные преимущества гибридных интегральных микросхем: возможность создания широкого класса цифровых и аналоговых микросхем при сравнительно коротком времени их разработки; возможность получения пассивных элементов широкой номенклатуры; МДП – приборы диодные и транзисторные матрицы и высокий процент выхода годных микросхем.

По типу используемого транзистора полупроводниковые ИМС принято подразделять на **биполярные** и **МДП ИМС**. Кроме того, в последнее время все большее значение приобретают ИМС, построенные на полевых транзисторах с управляющим переходом. К этому классу относятся ИМС на арсениде галлия, полевые транзисторы с затвором в виде диода Шоттки. В настоящее время намечается тенденция к построению ИМС, где одновременно будут использоваться и биполярные транзисторы, и полевые транзисторы.

Технология полупроводниковых ИС обоих классов основана на легировании (внесении) полупроводникового кристалла поочередно донорными и акцепторными примесями, в результате чего под поверхностью образуются тонкие слои с разным типом проводимости, то есть транзисторная структура $n-p-n$ или $p-n-p$ типа. Размеры одного транзистора составляют всего несколько микрометров. Изоляция отдельных элементов может быть осуществлена либо $p-n$ - переходом, либо диэлектрической пленкой. Транзисторная структура используется не только для создания транзистора, но и всех других элементов (диоды, резисторы, конденсаторы).

Помимо биполярных транзисторов в микроэлектронике применяют многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы.

Многоэмиттерные транзисторы (МЭТ) имеют один коллектор и несколько (до 8 – 10 и более) эмиттеров, объединенных одним общим базовым слоем. Они используются для создания схем транзисторно–транзисторной логики (ТТЛ).

Структура многоколлекторного транзистора такая же, как и структура МЭТ, но используется для создания логических схем с инжекционным питанием, называемых схемами интегральной инжекционной логики (И²Л).

Диоды. Диоды содержат один $p-n$ - переход. Но в биполярных ИМС основной структурой является транзисторная, поэтому диоды получают путем диодного включения транзисторов. Возможны пять вариантов таких включений. Если для создания диода используется $p-n$ - переход эмиттер – база, то $p-n$ - переход коллектор – база должен быть замкнут.

Резисторы. В биполярных ИМС для создания резисторов используют одну из областей биполярной транзисторной структуры: эмиттерную, базовую или коллекторную. На основе эмиттерных областей получают резисторы с малым сопротивлением. Наибольшим сопротивлением обладают резисторы, выполненные на основе слоя базы.

Конденсаторы. В биполярных ИМС применяют конденсаторы на основе $p-n$ - переходов, смещенных в обратном направлении. Формирование конденсаторов производится в едином технологическом цикле одновременно с изготовлением транзисторов и резисторов, что не требует дополнительных технологических операций их изготовления.

МДП–транзисторы. В ИМС в основном применяют МДП–транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом. Канал транзисторов может быть и p - и n -типа. МДП–транзисторы используют не только в качестве транзисторов, но и как резисторы и конденсаторы, то есть все схемные функции, реализуются на одних МДП – структурах. Если в качестве диэлектрика используют SiO_2 , тогда эти транзисторы называют МОП–транзисторами. При изготовлении МДП – структур отсутствуют операции по изоляции элементов друг от друга, так как истоки и стоки смежных транзисторов разделены встречновключенными $p-n$ - переходами. Поэтому МДП – транзисторы можно располагать близко друг к другу, что обеспечивает большую плотность компоновки.

Биполярные и МДП ИМС изготавливают по *планарной* или *планарно – эпитаксиальной* технологии.

В планарной технологии при изготовлении $n-p-n$ транзисторных структур в отдельные участки полупроводниковой пластины p -типа проводится локальное легирование примесей через специальные маски с отверстиями. Роль маски играет пленка двуокиси кремния SiO_2 , покрывающая поверхность пластины. В этой пленке специальными методами (фотолитография) формируются отверстия, называемые

окнами. Примеси вводятся путем диффузии (перемещение атомов примеси в полупроводниковую подложку под действием градиента их концентрации при высокой температуре), либо ионным легированием. При ионном легировании ионы примеси, получаемые из специальных источников, ускоряются и фокусируются в электрическом поле, попадают на подложку и внедряются в поверхностный слой полупроводника.

Пример структуры биполярной полупроводниковой ИМС, изготовленной по планарной технологии, и ее эквивалентная электрическая схема показаны на рис. 7.1 а, б.

На одной подложке диаметром 76 мм групповым методом одновременно можно создать до 5000 микросхем, каждая из которых может содержать от 10 до 20000 элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов). На пластине диаметром до 120 мм размещаются десятки миллионов элементов.

Современные ИМС изготавливаются по планарно–эпитаксиальной сплавной технологии. Эта технология отличается от планарной тем, что все элементы создаются в эпитаксиальном слое кремния n -типа, выращенном на подложке p -типа. Эпитаксией называют ориентированный рост слоя, кристаллическая решетка которого повторяет структуру подложки.

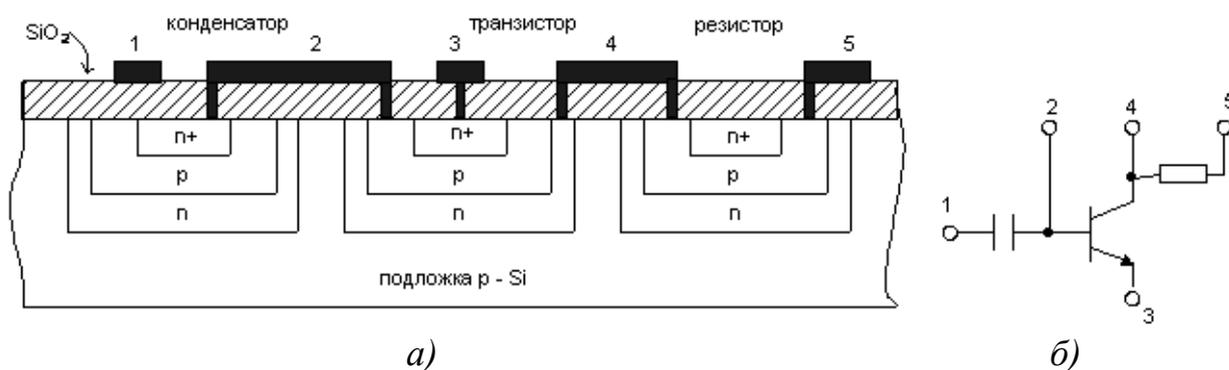


Рис. 7.1

Транзисторы, изготовленные по планарно–эпитаксиальной технологии, более экономичны, а также обладают улучшенными параметрами и характеристиками по сравнению с планарными.

Для этого в подложку перед эпитаксией вводится n^+ -слой, показанный на рис. 7.2. В этом случае ток через транзистор идет через низкоомный n^+ -слой, а не через высокоомное сопротивление тела коллектора.

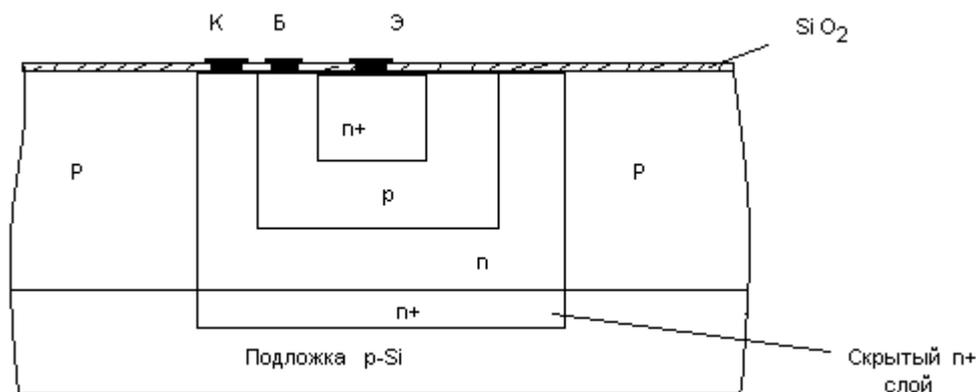


Рис. 7.2.

Для электрического соединения различных элементов микросхем применяется металлизация. В процессе металлизации образуются тонкие металлические пленки из золота, серебра, хрома или алюминия. В кремниевых ИМС для создания металлизации наибольшее применение нашел алюминий.

По схемотехническим признакам микросхемы делятся на два класса.

Основной функцией, выполняемой ИМС, является обработка (преобразование) информации, заданной в виде электрического сигнала: напряжения или тока. Электрические сигналы могут представлять информацию в непрерывной (аналоговой) или дискретной (цифровой) форме.

Поэтому микросхемы, выполняющие обработку аналоговой информации, называются **аналоговыми** интегральными схемами (АИС), а цифровой информации – **цифровыми** интегральными схемами (ЦИС).

В основе цифровых схем лежат простейшие транзисторные ключи (вентили). Ключи характерны двумя устойчивыми состояниями: разомкнутым и замкнутым. На основе простейших ключей строятся более сложные схемы: логические, бистабильные, триггерные (спусковые), шифраторные, компараторы и другие, применяемые главным образом в вычислительной технике. Они выполняют функции приема, хранения, обработки и выдачи информации, представленной в цифровой форме.

Уровень сложности интегральных микросхем характеризуется **степенью компонентной интеграции**, которая для цифровых ИМС характеризуется числом логических вентилей, содержащихся на кристалле.

ИМС с числом вентилей менее 100 относятся к ИМС малой степени интеграции. Средние (СИС) содержат порядка 10^2 , большие (БИС) - $10^2 \div 10^5$, сверхбольшие (СБИС) – $10^5 \div 10^7$ и ультрабольшие

(УСБИС) – свыше 10^7 вентилей. Эта классификация часто распространяется и на аналоговые микросхемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. С., Немцов М. В. «Электротехника». Высшая школа. Москва. 2000 г.
2. под редакцией В. Г. Герасимова «Электротехника». Высшая школа. Москва. 1989 г.
3. под редакцией В. Г. Герасимова «Основы промышленной электроники». Высшая школа. Москва. 1986 г.
4. В. Н. Ушаков «Электротехника и электроника». Учебное пособие. Москва. Высшая школа. 1997 г.