

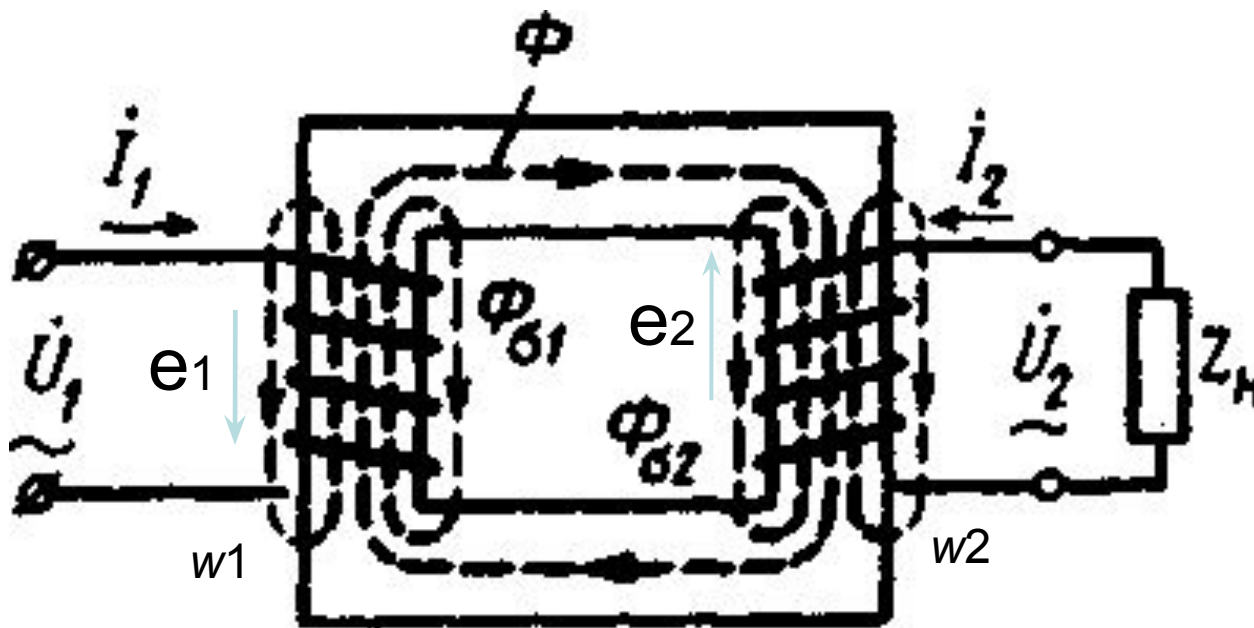
ТРАНСФОРМАТОРЫ

Назначение и принцип работы

Необходимость передачи электрической энергии на большое расстояние обусловила создание единых энергетических систем. В линиях электропередач теряется от 10 до 15% вырабатываемой электрической энергии. Чтобы сократить эти потери, нужно уменьшить силу тока (потери пропорциональны квадрату силы тока), т. е. повысить напряжение до сотен тысяч вольт. Повышение напряжения в процессе передачи электроэнергии и уменьшение его для использования осуществляются трансформаторами. Первый трансформатор построил в 1876 г. русский изобретатель П. Н. Яблочков.

- ***Трансформатор*** — это электромагнитный аппарат, который преобразует электрическую энергию переменного тока, имеющую одни величины, в электрическую энергию с другими величинами. В трансформаторе преобразуются напряжение, ток и начальная фаза. Неизменной остается частота тока.

- Простейший трансформатор имеет магнитопровод (сердечник) и обмотки. По количеству обмоток различают трансформаторы двухобмоточные и многообмоточные. На рисунке показано устройство двухобмоточного трансформатора. Обмотка с количеством витков w_1 , к зажимам которой подводится напряжение, называется **первичной**. На зажимы **вторичной** обмотки с числом витков w_2 включается потребитель Z_H .



- Переменный ток в первичной цепи индуцирует основной магнитный поток Φ , который замыкается в магнитопроводе, и поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, который замыкается в воздухе. Переменный магнитный поток Φ индуцирует ЭДС в первичной e_1 и вторичной e_2 обмотках. Если на вторичную обмотку включить нагрузку, то начнет протекать ток I_2 и возникнет поток рассеяния вторичной обмотки $\Phi_{\sigma 2}$.

- Основной магнитный поток индуцирует ЭДС в первичной и вторичной обмотках:

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d\Phi}{dt};$$

$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

- Эти ЭДС совпадают по фазе и отстают от потока на $\pi/2$.
- Действующие значения ЭДС можно определить из уравнения трансформаторной ЭДС, т. е.

$$E_1 = 4,44\Phi_m f w_1; \quad E_2 = 4,44\Phi_m f w_2.$$

- С достаточной точностью можно считать, что

$$E_1 \approx U_1; \quad E_2 \approx U_2;$$

$$I_1 U_1 \approx I_2 U_2.$$

- Важной характеристикой трансформатора является **коэффициент трансформации**, который в обычном случае определяется как отношение первичного напряжения ко вторичному.
- Коэффициент трансформации для однофазного трансформатора

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

- При $U_1 > U_2$ трансформатор называется **понижающим**, а при $U_1 < U_2$ — **повышающим**.
- Из этого следует, что трансформатор снижает напряжение и во столько же раз повышает ток (и наоборот).

Реальный, идеализированный и приведенный трансформаторы

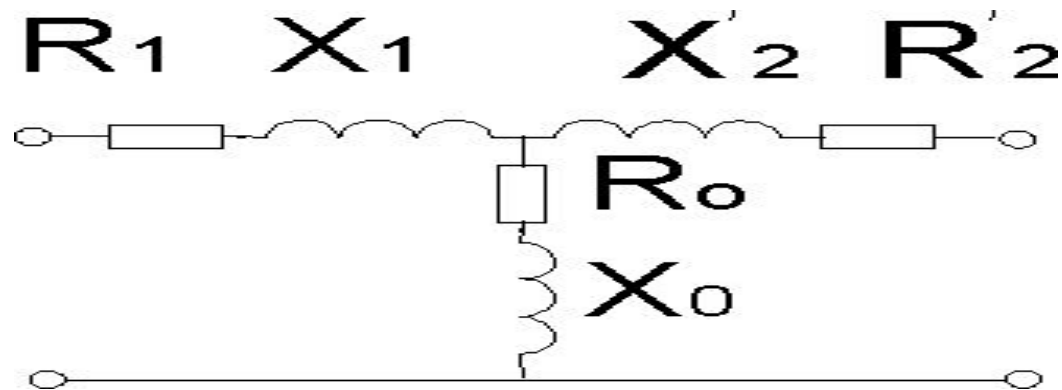
- ***Реальный трансформатор*** имеет обмотки, расположенные на сердечнике. Обмотки имеют как активное сопротивление R , так и сопротивление рассеяния X , т. е., кроме основного магнитного потока, пронизывающего обе обмотки, существуют потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток.

- При теоретическом анализе работы трансформатора часто употребляют термин «идеализированный трансформатор».
- ***Идеализированный трансформатор*** — это трансформатор, в котором отсутствуют магнитные потоки рассеяния, а активные сопротивления обмоток равны нулю. Это понятие используют для упрощенных исследований процессов.

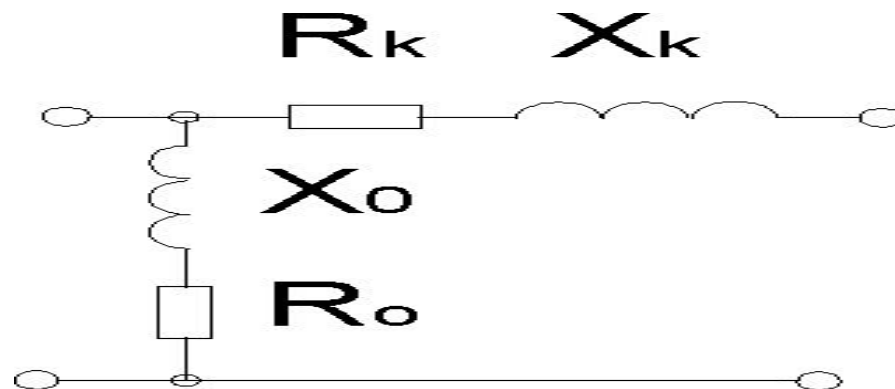
- В теоретических исследованиях и при построении схем замещения трансформатора пользуются также понятием приведенного трансформатора.
- ***Приведенный трансформатор*** — эквивалентный реальному трансформатору, у которого коэффициент трансформации равен единице (количество витков вторичной обмотки равно количеству витков первичной обмотки). Для замещения реального трансформатора приведенным нужно выдержать принципы эквивалентности энергетического состояния. Приведенные электрические величины обозначаются штрихами.

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

- Т-образная схема замещения



- Г-образная схема замещения



- . В общем случае приведенные величины

$$\dot{U}_2' = -\dot{U}_2 k_T; \quad \dot{E}_2' = -\dot{E}_2 k_T;$$

$$R_2' = R_2 k_T^2; \quad X_2' = X_2 k_T^2;$$

$$Z_2' = Z_2 k_T^2. \quad \dot{I}_2' = -\dot{I}_2 \frac{1}{k_T},$$

$$R_H' = R_H k_T^2; \quad X_H' = X_H k_T^2.$$

$$Z_H' = Z_H k_T^2;$$

• Математическое описание приведенного трансформатора

- Приведенный трансформатор описывается тремя уравнениями:

- а) соотношением токов
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2);$$

- б) уравнением первичной цепи

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_1;$$

- в) уравнением вторичной приведенной цепи

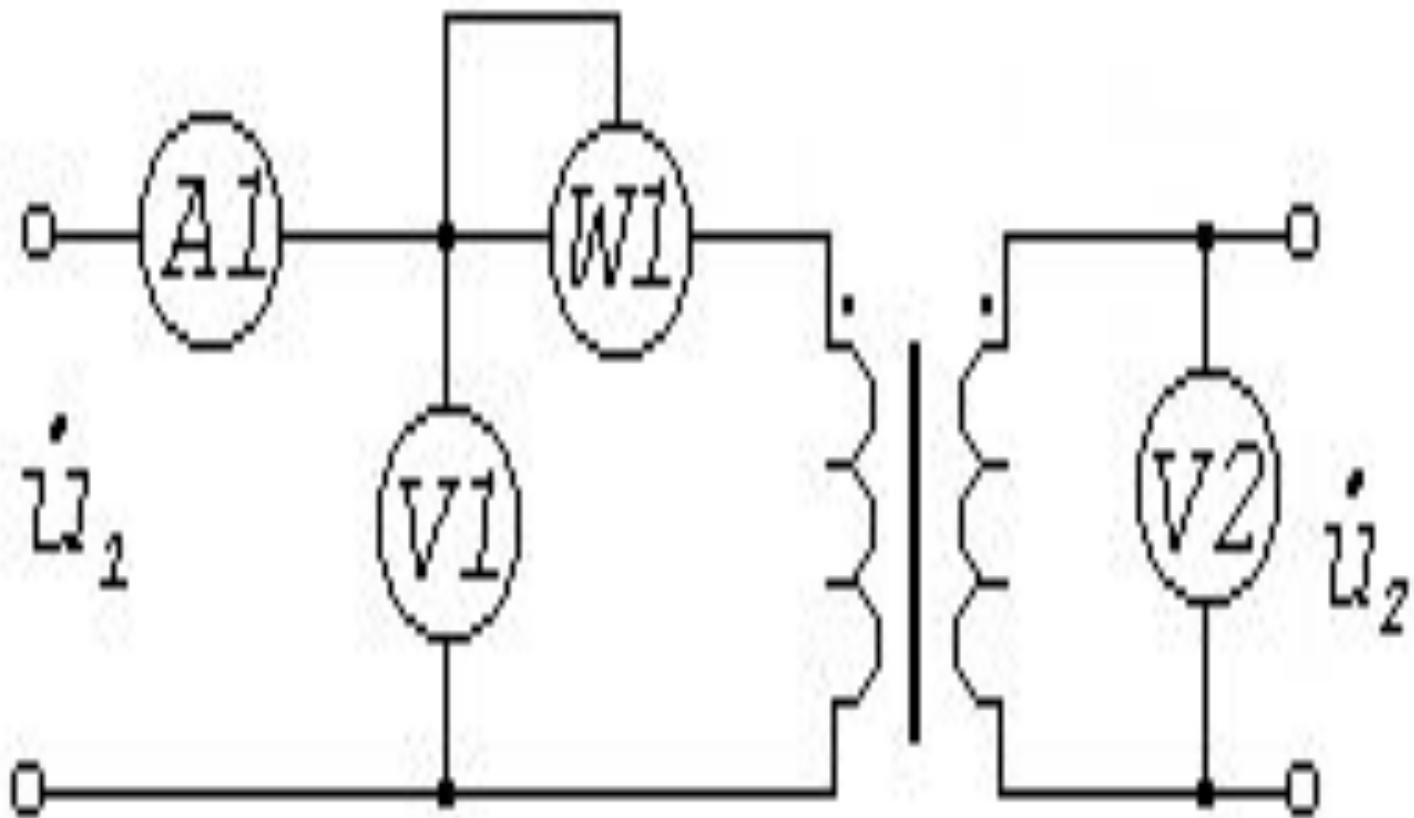
$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j \dot{I}_2 X_2' - \dot{I}_2 R_2'$$

- Эти уравнения устанавливают аналитическую связь между параметрами трансформатора во всем диапазоне нагрузок от режима х.х. до номинальной

Определение параметров трансформатора

- Все параметры трансформатора могут быть определены из его схемы замещения как расчетным, так и опытным путем. Методы опытного определения параметров трансформатора:
 - Опыт холостого хода
 - Опыт короткого замыкания

ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА



- Первичная обмотка подключается к синусоидальному напряжению, а вторичная обмотка разомкнута ($Z_H = \infty$ $I_2 = 0$). К первичной обмотке подводится номинальное напряжение $U_{1\text{ном}} = U_{10}$, на вторичной обмотке тоже номинальное напряжение $U_{2\text{ном}}$. Измеренная ваттметром мощность, потребляемая в трансформаторе при х.х. $P_o = P_{\text{ст}}$ – мощность потерь в стали (магнитные потери) – указывается в паспорте трансформатора. Измеренный ток х.х. в первичной цепи указывается в паспорте трансформатора через % - $i_{0\%}$, $I_{10} = i_{0\%} * I_{1\text{ном}} / 100$

- Из опыта х.х определяют параметры **ветви намагничивания**- полное сопротивление Z_0 и активную составляющую сопротивления R_0 определяем из соотношений:

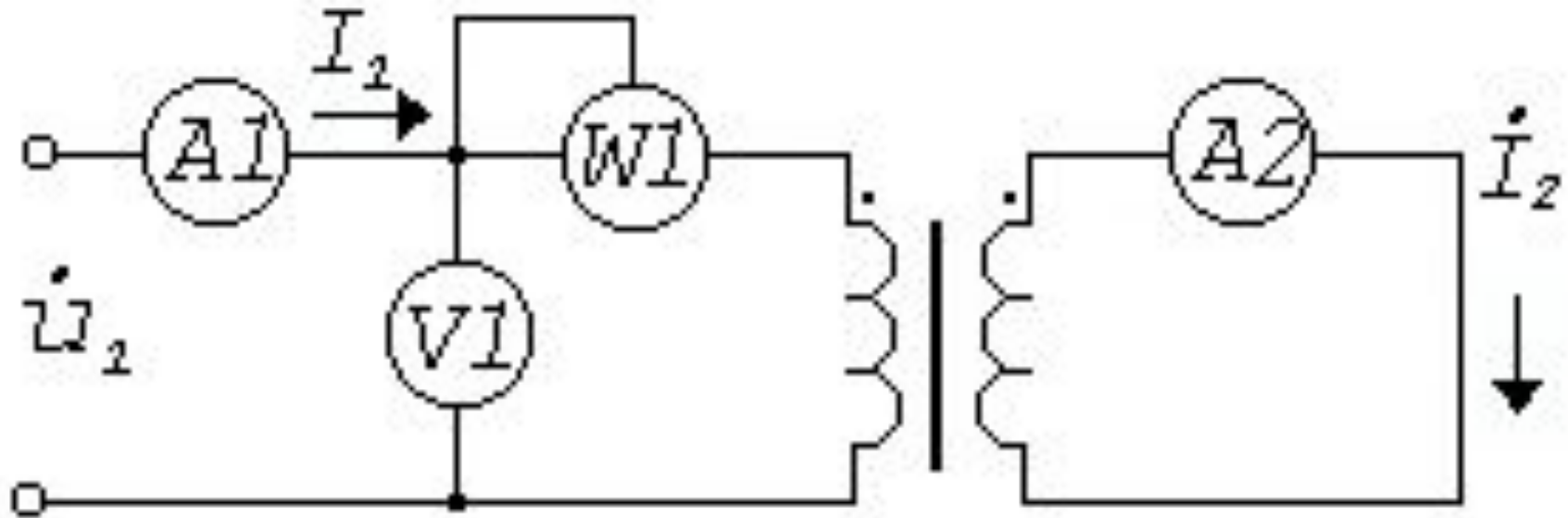
$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} \qquad R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}$$

- где P_0 - активная мощность определяемая с помощью ваттметра W1. Определив Z_0 и R_0 можем найти реактивную составляющую X_0 и значение коэффициента мощности холостого хода:

- $$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \qquad \cos(\varphi_0) = \frac{P_0}{U_{10} \cdot I_{10}}$$

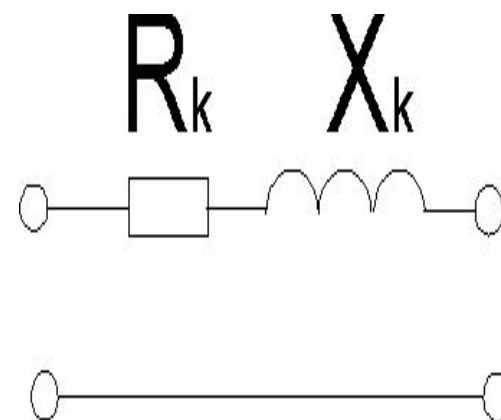
ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

-



- Под режимом короткого замыкания трансформатора подразумевают такой режим, когда вторичная обмотка замкнута накоротко ($Z_H = 0, U_{2H} = 0$). Такой режим является аварийным. Поэтому напряжение на первичной обмотке пониженное и его выбирают таким образом, чтобы потребляемый трансформатором ток не превышал номинальный. Величину данного напряжения (напряжение к.з) указывают в паспорте через $u_{k\%}$.

$$u_{k\%} = U_{1k} * 100 / U_{1ном.}$$



Ваттметром измеряют также потери в обмотках трансформатора P_k - паспортная данная.

- Из опыта к.з определяют параметры - полное значение сопротивления короткого замыкания Z_K и активную составляющую сопротивления R_K короткого замыкания :

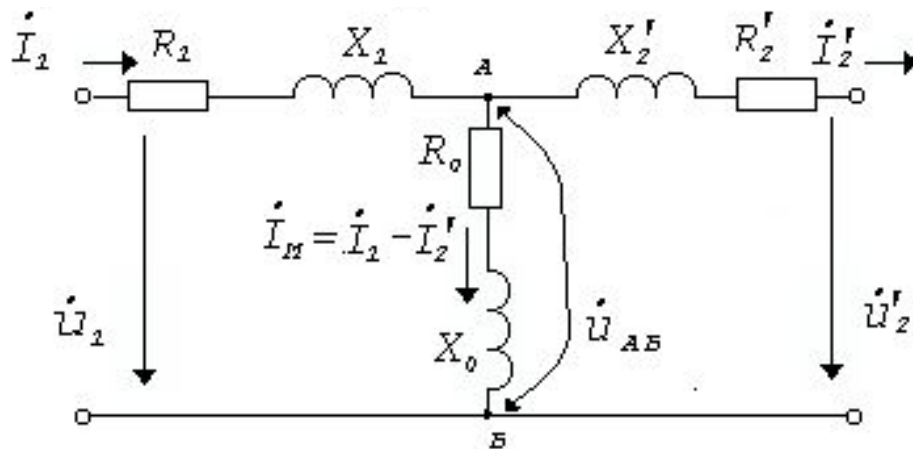
- $$Z_K = U_{1K} / I_{1K} \qquad R_K = \frac{P_K}{I_{1K}^2}$$

- Определив значения Z_K и R_K , находим реактивную составляющую полного сопротивления X_K и коэффициент мощности из соотношений:

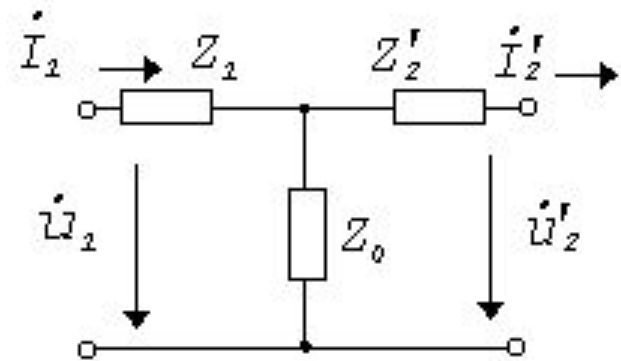
- $$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \qquad \cos(\varphi_K) = \frac{P_K}{U_{1K} \cdot I_{1K}}$$

Режим нагрузки приведенного трансформатора

- **Режим нагрузки** осуществляется, когда на вторичную обмотку включена нагрузка, а во вторичной цепи протекает ток $\dot{I}_2'$.



ИЛИ



где

$$Z_1 = R_1 + jX_1; Z_2' = R_2' + jX_2'; Z_0 = R_0 + jX_0$$

Векторная диаграмма нагруженного трансформатора

- Векторная диаграмма — графическое выражение основных уравнений приведенного трансформатора .
- Следовательно, для построения векторной диаграммы нагруженного трансформатора необходимо использовать основные уравнения трансформатора.
- Построение диаграммы следует начинать с вектора максимального значения основного магнитного потока .

$$\Phi_{\text{max}} = E_1 / (4,44 f w_1)$$

- Порядок построения векторной диаграммы такой.

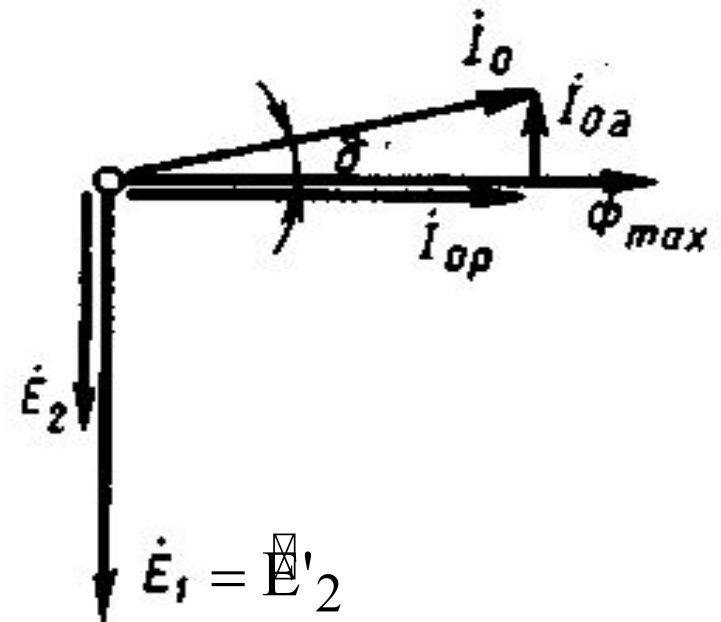
1. Строится вектор магнитного потока $\Phi_{\max}$ (направляем произвольно по горизонтали).
2. Вектор тока нерабочего хода I_0 опережает вектор потока на угол δ магнитного запаздывания и распадается на реактивную I_{0p} , представляющую собой намагничивающий ток, и активную I_{0a} , обусловленную магнитными потерями:

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2} \quad \delta = 90^\circ - \varphi_0$$

3. Строятся векторы

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 \cong U_{10} = U_{1\text{ном}}$$

они отстают от потока на 90° .



- 4. Определяется сдвиг фаз между током $\vec{I}_2$ и ЭДС $\vec{E}_2'$. Если нагрузка активно-индуктивная, тогда вектор $\vec{I}_2$ отстает по фазе от $\vec{E}_2'$ на угол

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_2' + X_H'}{R_2' + R_H'}$$

- и строится вектор тока $\vec{I}_2$

- 5. По соотношению токов

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + (-\vec{I}_2)$$

- строится вектор первичного тока $\vec{I}_1$

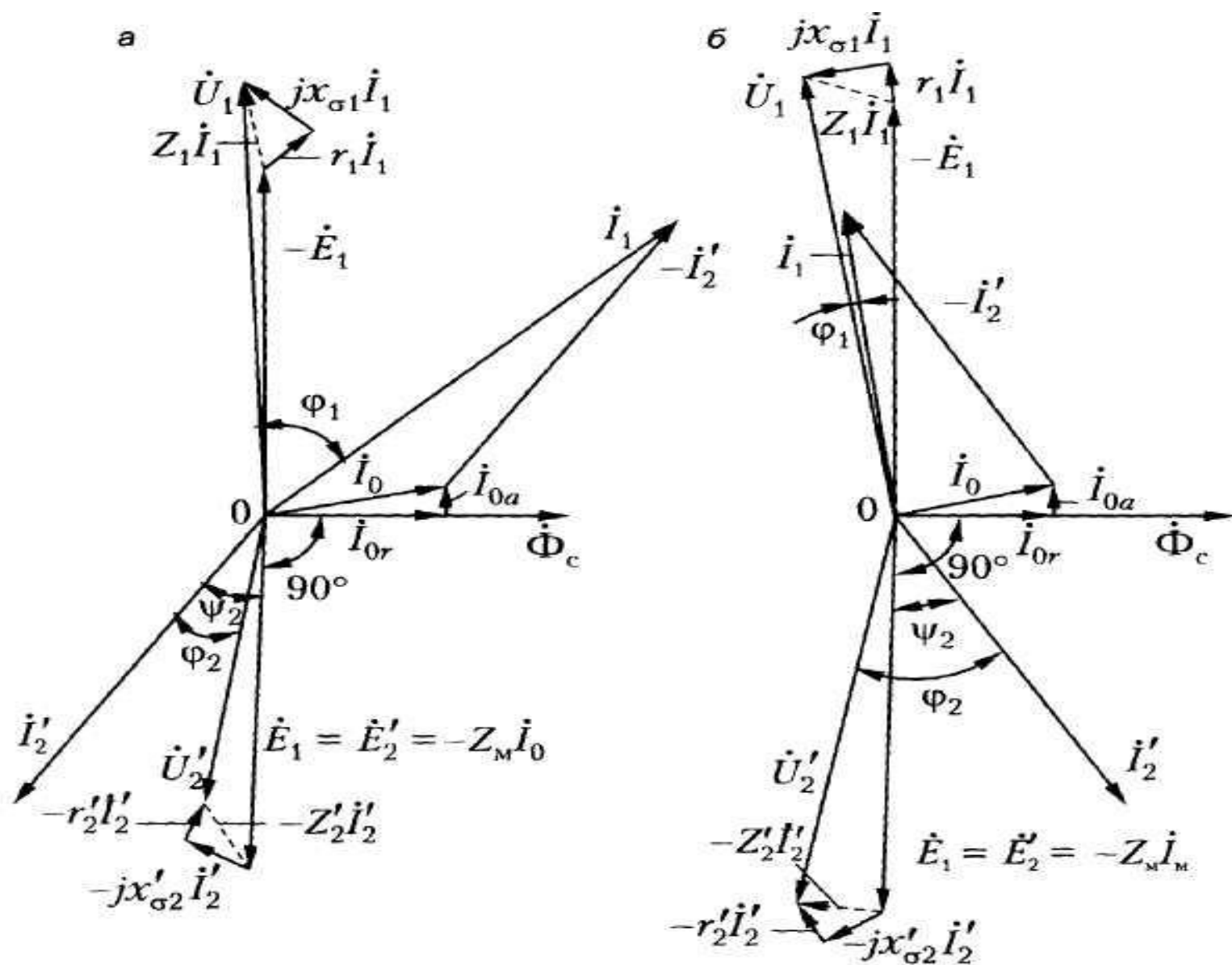
- 6. По уравнению вторичной цепи

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2;$$

- строится вектор вторичного напряжения $\dot{U}'_2$
- 7. По уравнению первичной цепи

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_{p1}$$

- строится вектор напряжения первичной цепи $\dot{U}_1$
- 8. Определяются сдвиги фаз φ_1 и φ_2 между токами и напряжениями.



ис. 15.1. Векторные диаграммы трансформатора: *a* — при смешанной активно-индуктивной и *б* — активно-емкостной нагрузках

- В случае активно-емкостной нагрузки векторная диаграмма трансформатора имеет вид, показанный на рис. 6. Порядок построения диаграммы остается прежним, но вид ее несколько изменяется. Ток I_2 в этом случае опережает по фазе ЭДС E_2 на угол

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 - x'_H}{r'_2 + r'_H}.$$

- Иногда векторную диаграмму трансформатора строят с целью определения ЭДС обмоток. В этом случае заданными являются параметры вторичной обмотки: U_2 , I_2 и $\cos \varphi_2$. Зная w_1/w_2 , определяют U'_2 и I'_2 , а затем строят векторы этих величин под фазовым углом φ_2 друг к другу. Вектор ЭДС $E'_2 = E_1$ получают геометрическим сложением вектора напряжения U'_2 с падениями напряжения во вторичной обмотке

$$E'_2 = U'_2 + jI'_2 x'_2 + I'_2 r'_2.$$

Потери и КПД в трансформаторах

- Мощность, потребляемая трансформатором

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

- а мощность, которая передается на нагрузку,

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

- КПД трансформатора определяется соотношением

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_1}.$$

- **Уравнение баланса активных мощностей** имеет вид

$$P_1 = P_2 + P_M + P_{\Sigma},$$

- где P_M — магнитные потери (потери в стали),
- P_{Σ} — электрические потери (потери в меди), т. е.

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_{\Sigma}}.$$

- **1. Магнитные потери** (потери в стали) — это:

- потери от гистерезиса P_{Γ}

- потери от вихревых токов $P_{B.T.}$

$$P_M = P_{\Gamma} + P_{B.T.}$$

- Магнитные потери зависят только от магнитного потока и не зависят от силы тока в обмотках. Поскольку основной магнитный поток является постоянным (он пропорционален первичному напряжению), потери в стали также считаются постоянными. Следовательно, *магнитные потери не зависят от коэффициента загрузки трансформатора*

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$$

- Магнитные потери определяются экспериментально или вычисляются по эмпирическим зависимостям, например

$$P_M = P_{1,0/400} \left(\frac{B_m}{1,0} \right)^2 \left(\frac{f}{400} \right)^{1,5} G_M,$$

- где $P_{1,0/400}$ — потери в 1 кг стали при индукции $B_m = 1$ Тл и частоте $f = 400$ Гц;

- G_M — масса сердечника.

- Для изготовленного трансформатора магнитные потери определяют опытным путем, измерив мощность х.х. при номинальном первичном напряжении $P_{0ном}$.

- **2. Электрические потери** — это потери в меди обмоток, т. е. $P_{\Sigma} = R_1(t^{\circ})I_1^2 + R_2(t^{\circ})I_2^2$.
- При определении потерь учитываются изменения активного сопротивления обмоток от нагрева. Электрические потери прямо пропорциональны квадрату тока, т. е.

$$P_{\Sigma} = \beta^2 P_{\text{к.ном.}}$$

- где β — коэффициент нагрузки.

- КПД трансформатора зависит от электрических потерь, т. е. зависит от загрузки

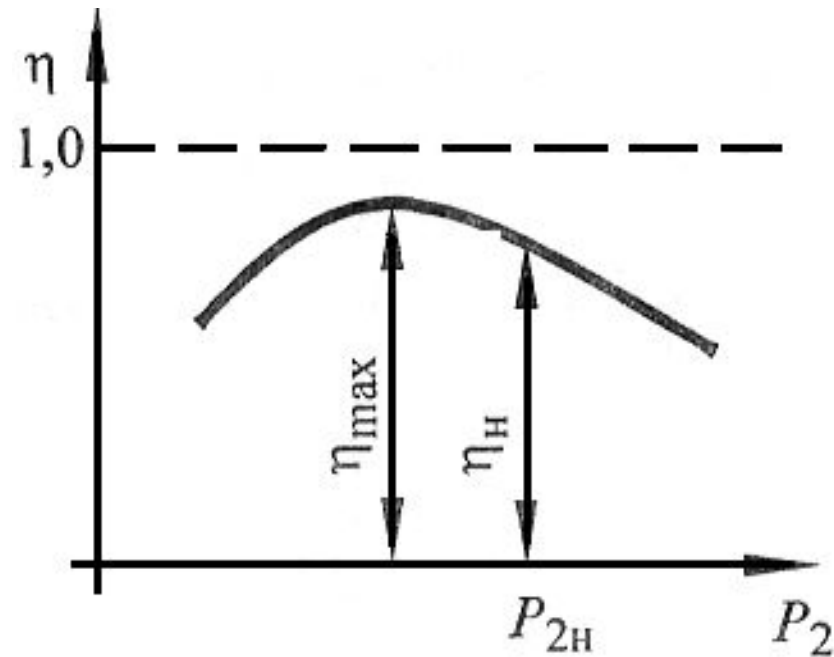
$$\eta_T = f(\beta).$$

- На рисунке приведена зависимость КПД от мощности P_2 .

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{ном}} + \beta^2 P_{\text{кном}}}$$

- Трансформатор проектируется таким образом, что КПД достигает максимума при наиболее вероятной нагрузке. При этом коэффициент загрузки несколько меньше единицы. Можно доказать, что максимальным КПД трансформатора при максимальной его нагрузке будет, если $P_M = P_{\Sigma}$, т.е. $P_{0\text{ном}} = \beta'^2 P_{\text{кном}}$.
- отсюда значение коэффициента нагрузки, соответствующее максимальному КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{0\text{ном}} / P_{\text{к.ном}}}$$



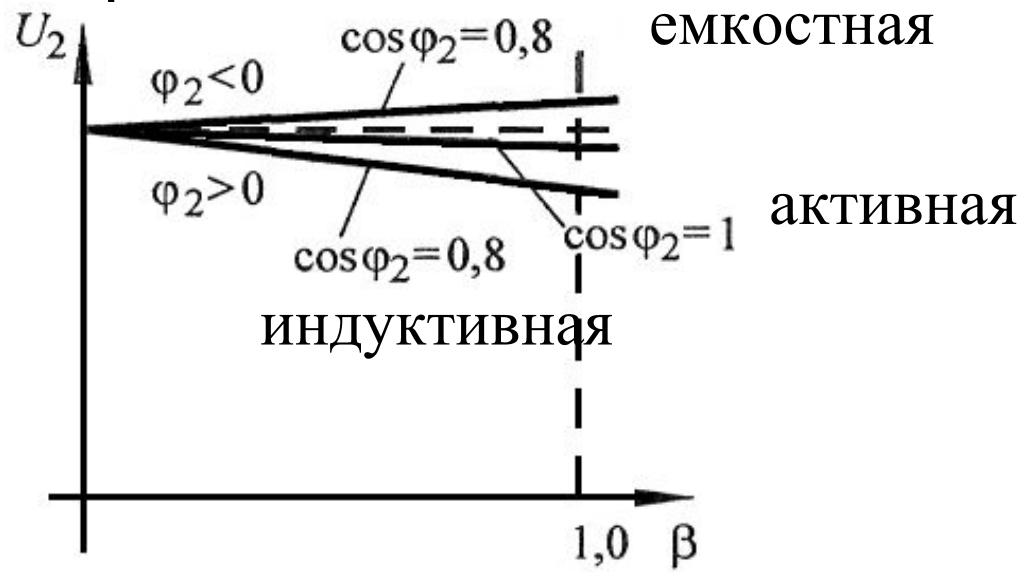
Получим выражение максимального КПД трансформатора

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + 2P_{0\text{ном}}}$$

- КПД трансформатора в значительной мере зависит от мощности и достигает значений:
- 0,7...0,75 — в трансформаторах малой мощности (несколько ватт),
- 0,9...0,95 — в трансформаторах средней мощности,
- 0,95...0,995 — в трансформаторах большой мощности.

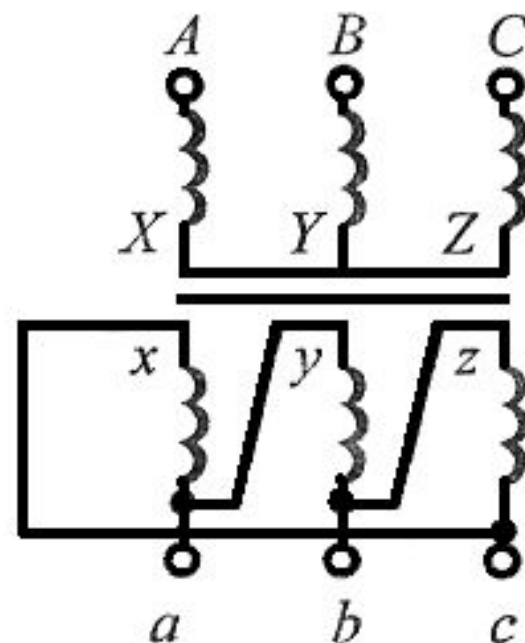
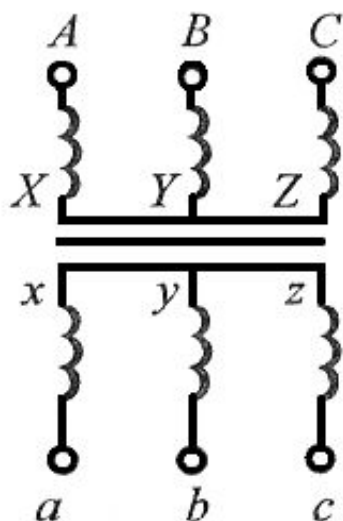
Внешние характеристики трансформатора

- Зависимость $U_2 = f(\beta)$ называется внешней характеристикой трансформатора. Вид внешней характеристики зависит от особенностей загрузки, и при емкостной загрузке она может быть даже возрастающей.



Трехфазные трансформаторы

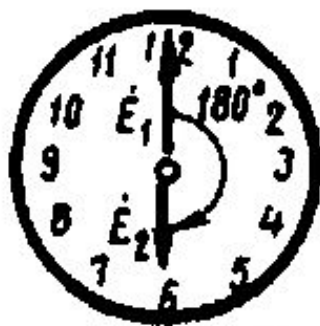
- Трехфазный ток можно преобразовывать тремя однофазными или одним трехфазным трансформатором. На рисунке приведено схематическое изображение трехфазных трансформаторов, соединенных Y/Y и Y/Δ . Обычно первичная обмотка обозначается большими буквами, а вторичная — маленькими. Начала обмоток обозначаются A, B, C, a, b, c , концы



- Стандартом нормируется несколько схем соединения. Пример обозначения:
- Y/Y — 12 — звезда — звезда,
- Y/Δ — 11 — звезда — треугольник,
- Y/Y_0 — 12 — звезда — звезда с нулем.
- Числа 11 и 12 показывают группу соединения и характеризуют взаимное расположение векторов высшего и низшего **линейного** напряжения. Угол между векторами **первичного** и **вторичного** линейного напряжения равен углу между часовой и минутной стрелками в определенное время. В группе 12 этот угол равен 360° , в группе 11 — 330° .



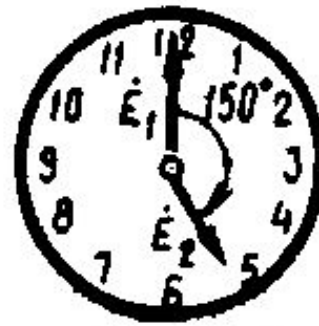
Группа 0



Группа 6

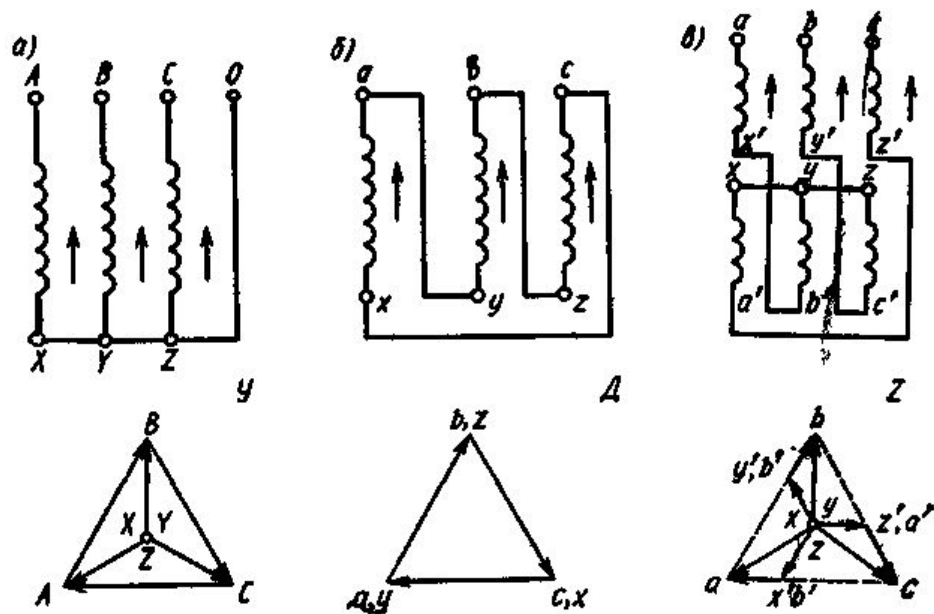
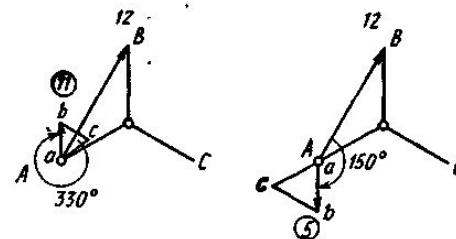
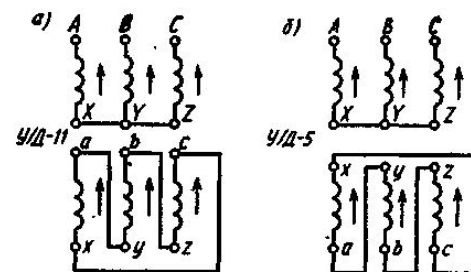
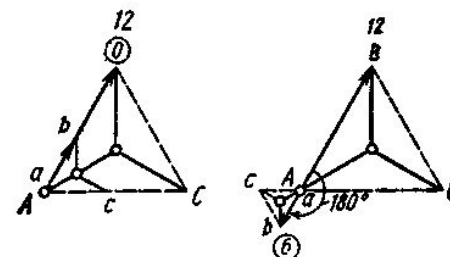
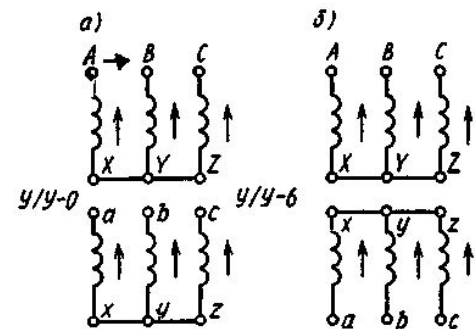


Группа 11



Группа 5

Схемы и группы соединения трансформаторов



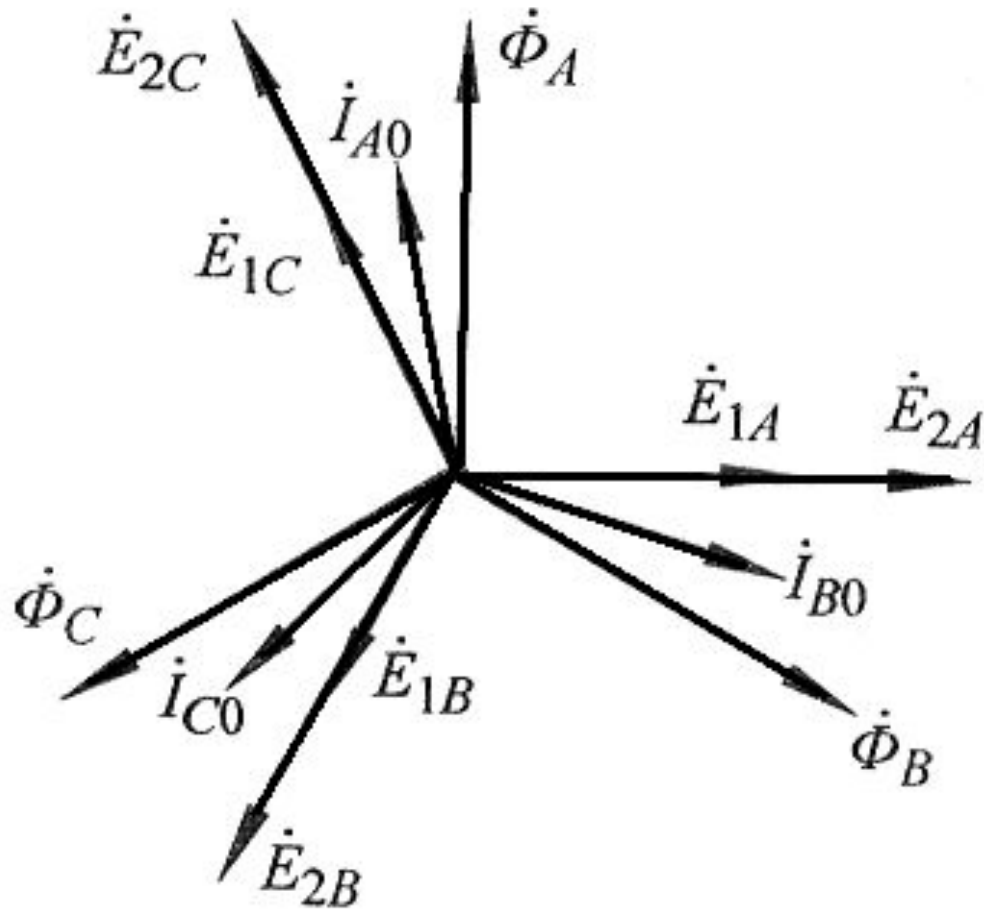
- В трехфазных трансформаторах различают два коэффициента трансформации — фазный и линейный.
- Для трехфазного трансформатора **фазным коэффициентом трансформации** называют отношение фазных напряжений первичной и вторичной обмоток в режиме холостого хода, т. е.

$$K_{\phi} \approx \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}}$$
- **Линейный коэффициент трансформации** трехфазного трансформатора — это отношение линейных напряжений в режиме холостого хода, т. е.

$$K_{\text{л}} \approx \frac{U_{\text{л}1}}{U_{\text{л}2}}$$
- В случае соединения по схемам Y/Y и Δ/Δ коэффициенты трансформации равны ($K_{\text{л}} = K_{\phi}$). Если схема соединения обмоток Y/Δ, то $K_{\text{л}} = \sqrt{3}K_{\phi}$, а при соединении Δ/Y —

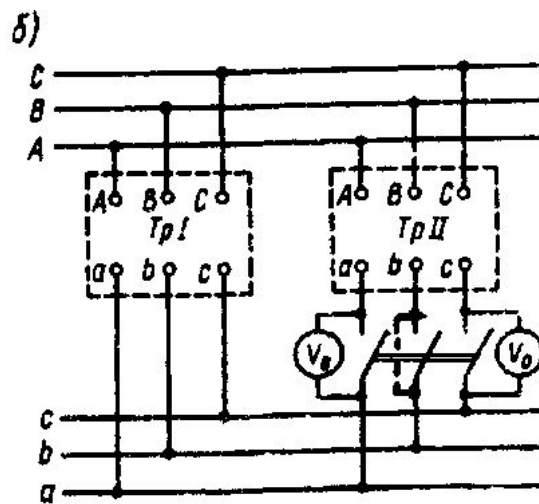
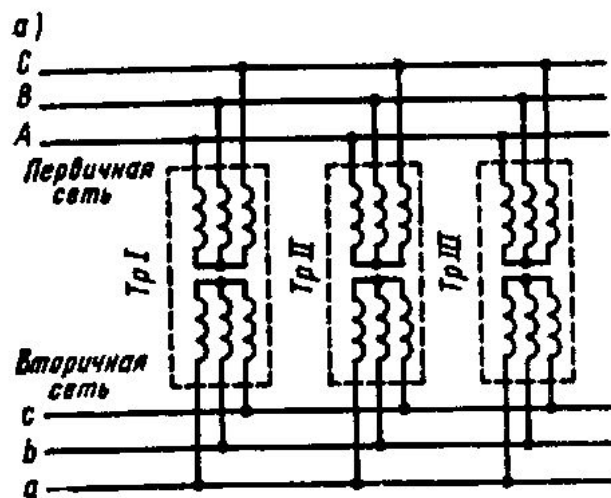
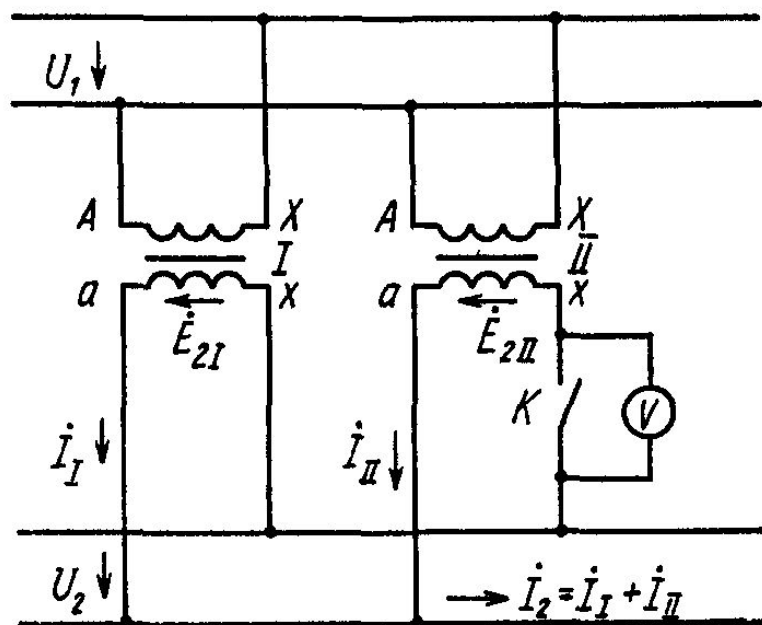
$$K_{\text{л}} = \frac{K_{\phi}}{\sqrt{3}}$$

- Векторная диаграмма трехфазного трансформатора строится на векторах потоков, которые сдвинуты на 120° . Токи нерабочего (холостого) хода опережают потоки на угол магнитного запаздывания. ЭДС обмоток отстают от векторов потоков на 90° .



Параллельная работа трансформаторов

- *Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов* называется работа при параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети .



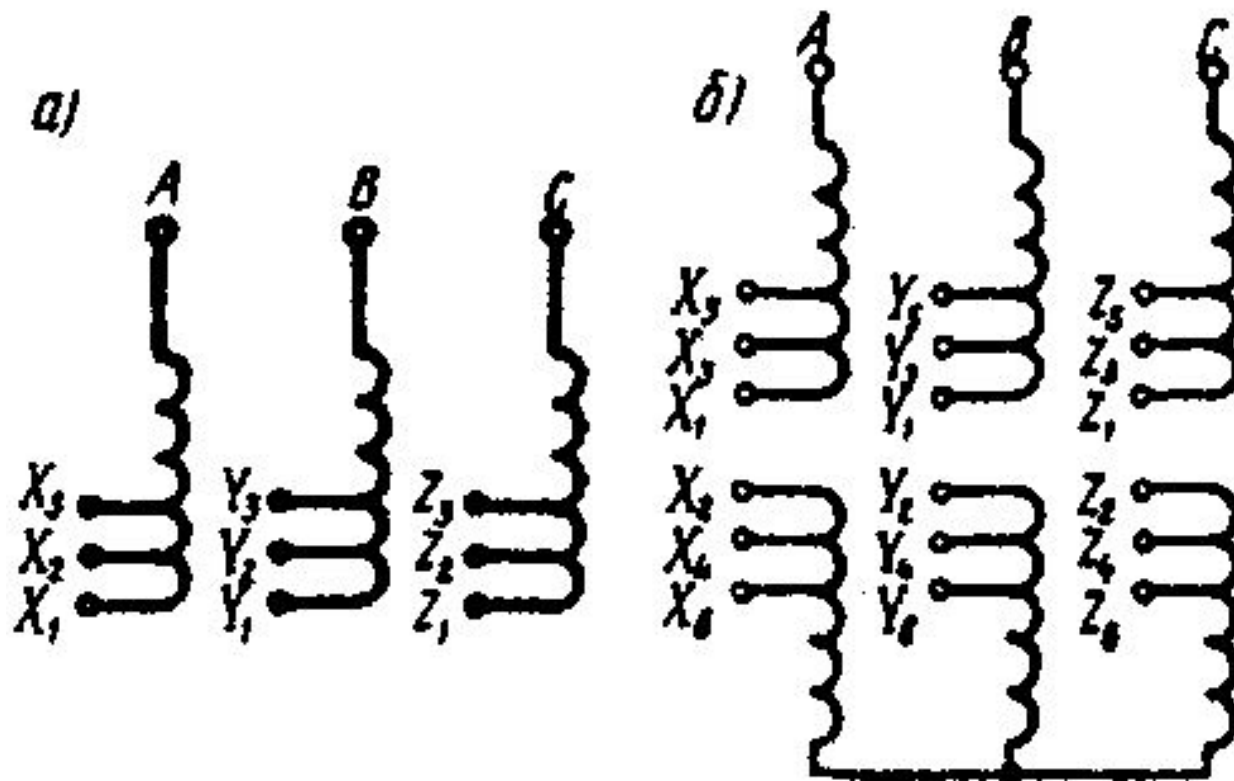
Условия параллельной работы

- 1. При одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения должны быть равны.
- 2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения.
- 3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения к. з.
-

. Регулирование напряжения трансформаторов

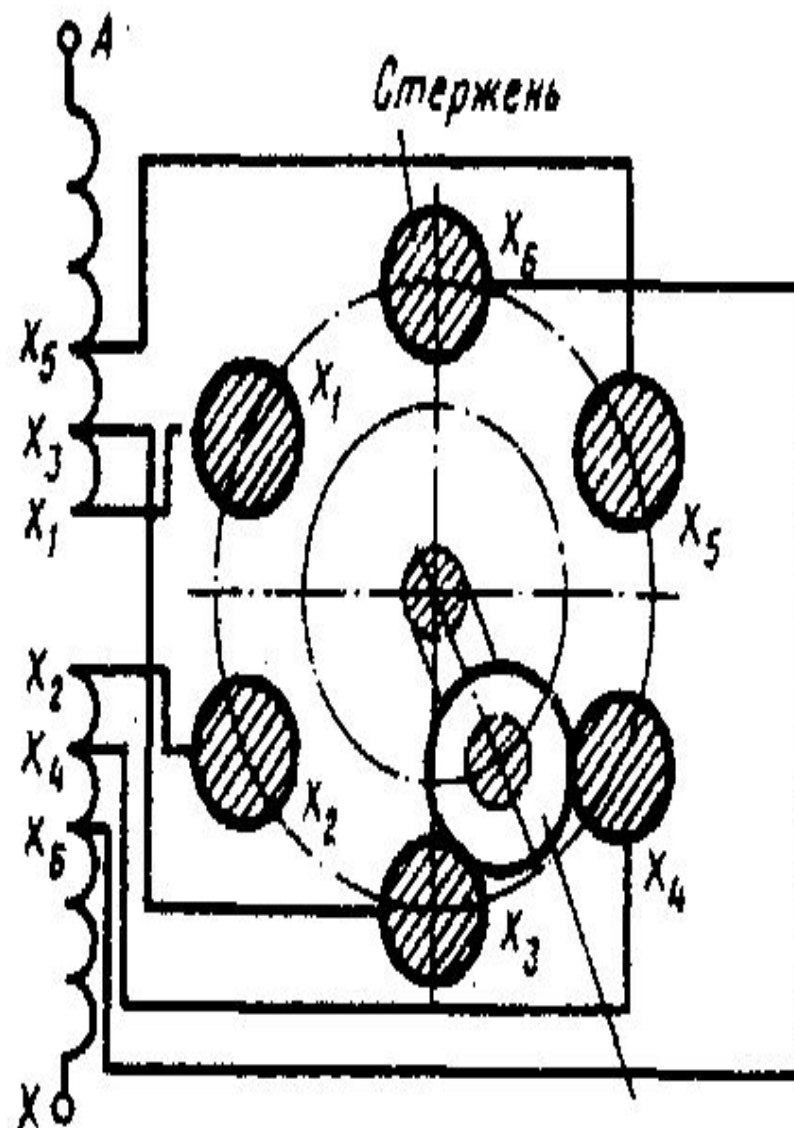
- Для регулирования напряжения обмотки ВН понижающих трансформаторов снабжают регулировочными ответвлениями. Регулировочные ответвления делают в каждой фазе либо вблизи нулевой точки, либо посередине обмотки .

- Схемы обмоток трехфазных трансформаторов с регулировочными ответвлениями



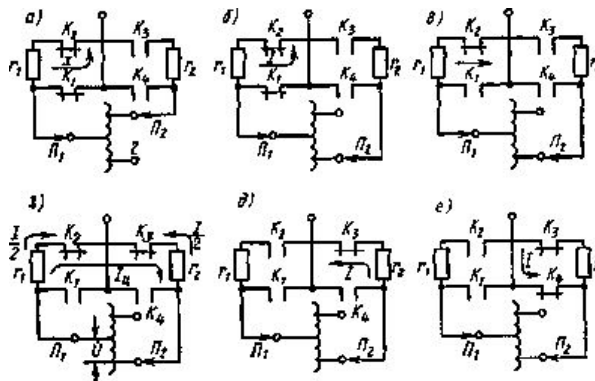
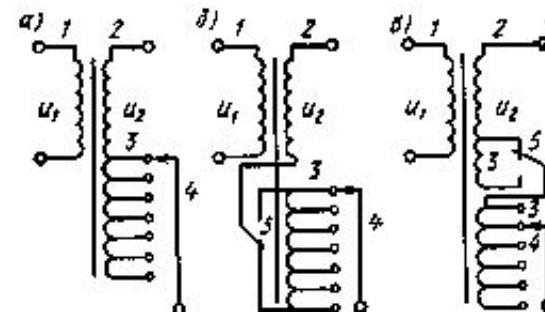
- В первом случае на каждой фазе делают по три ответвления (рис. а), при этом среднее ответвление соответствует номинальному коэффициенту трансформации, а два других — коэффициентам трансформации, отличающимся от номинального на $\pm 5\%$. Во втором случае обмотку разделяют на две части и делают шесть ответвлений (рис. , б). Это дает возможность кроме номинального коэффициента трансформации получить еще **четыре** дополнительных значения, отличающихся от номинального на $\pm 2,5$ и $\pm 5\%$.

- Переключать ответвления обмоток можно при **отключенном** от сети трансформаторе (переключение без возбуждения — ПБВ) или же **без отключения** трансформатора (регулирование под нагрузкой — РПН).
- Для ПБВ применяют переключатели ответвлений. На каждую фазу устанавливают по одному переключателю. при этом вал, вращающий контактные кольца переключателей по всем фазам одновременно, связан посредством штанги с рукояткой на крышке бака трансформатора



ПБВ

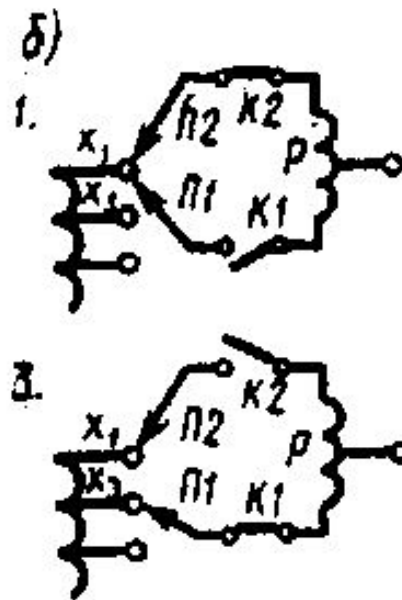
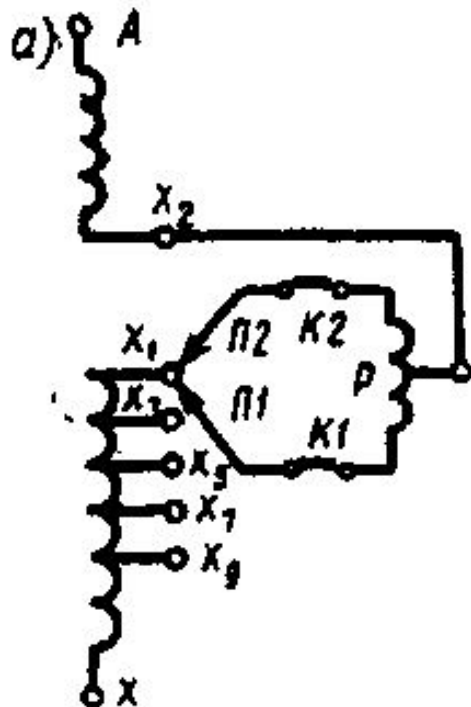
РПН



резисторного типа

реакторного типа

- Принцип РПН основан на изменении коэффициента трансформации посредством регулировочных ответвлений. Однако переключение с одного ответвления на другое осуществляют без разрыва цепи рабочего тока. С этой целью обмотку каждой фазы снабжают специальным переключающим устройством, состоящим из реактора P двух контакторов с контактами $K1$ и $K2$ и переключателя с двумя подвижными контактами $\Pi1$ и $\Pi2$



- В рабочем положении оба подвижных контактора переключателя находятся на одном ответвлении, контакты $K1$ и $K2$ замкнуты и рабочий ток направлен параллельно по двум половинам обмотки реактора. Если возникла необходимость переключения с одного ответвления на другое, например с $X1$ на $X3$, то разомкнутся контакты контактора $K1$ (положение 1 на рис. 1.44, б), подвижный контакт $\Pi1$ переключателя обесточенной ветви переводится на другое ответвление и контакты контактора $K1$ вновь замыкаются (положение 2). В этом положении часть обмотки между ответвлениями $X1$ и $X3$ оказывается замкнутой. Однако ток в цепи переключающего устройства не достигает большого значения, так как он ограничивается сопротивлением реактора P . В таком же порядке осуществляется перевод подвижного контакта $\Pi2$ с ответвления $X1$ на ответвление $X3$ (положения 3 и 4). после чего процесс переключения заканчивается. Аппаратура РПН располагается в общем баке с трансформатором, а ее переключение автоматизируется или осуществляется дистанционно (со щита управления). Трансформаторы с РПН обычно рассчитаны для регулирования напряжения в пределах 6—10%.

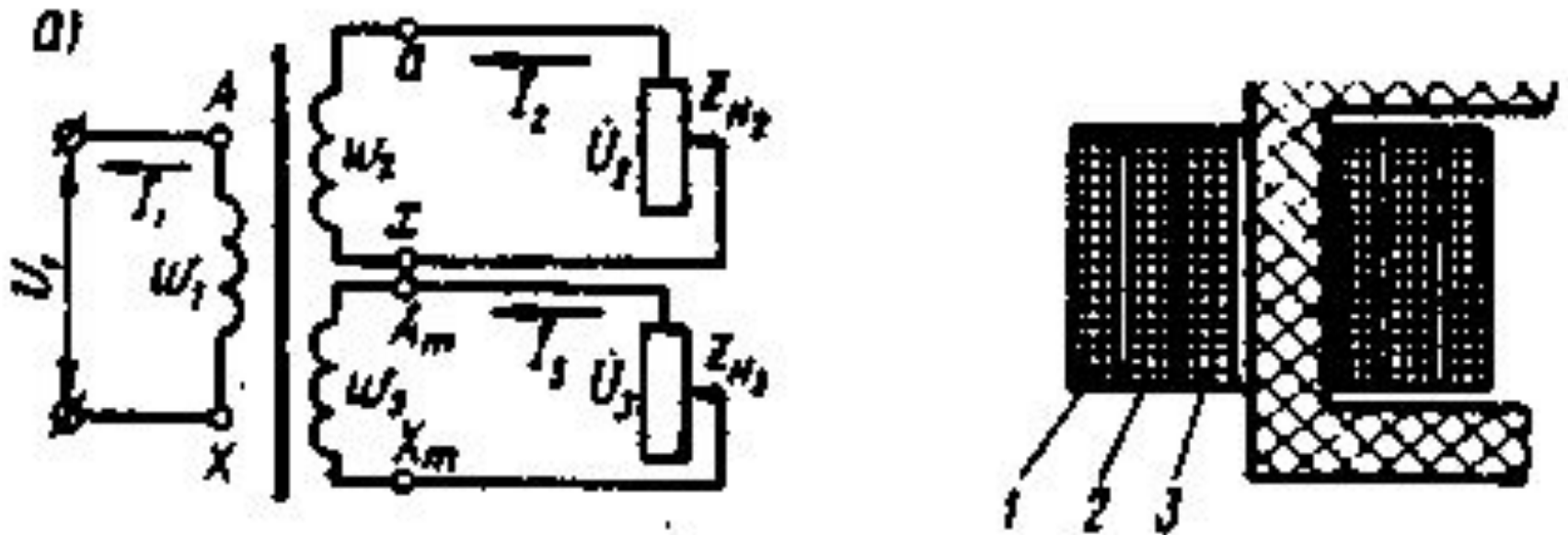
Способы регулирования

1. Трансформаторы, регулируемые магнитной коммутацией
2. Трансформаторы, регулируемые перераспределением напряжения
3. Трансформаторы с полупроводниковой коммутацией обмоток
4. Регуляторы напряжения с промежуточным звеном повышенной частоты

Трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы

- Трехобмоточные трансформаторы
- В трехобмоточном трансформаторе на каждую трансформируемую фазу приходится **три обмотки**. За номинальную мощность такого трансформатора принимают номинальную мощность наиболее нагружаемой его обмотки. Токи, напряжения и сопротивления других обмоток приводят к числу витков этой, наиболее мощной обмотки. Принцип работы трехобмоточного трансформатора по существу не отличается от принципа работы обычного двухобмоточного трансформатора .
- Существуют трехобмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками и трансформаторы с двумя первичными (для резервирования питания- заменяет два двухобмоточных) и одной вторичной обмотками (обычно на крупных электростанциях).

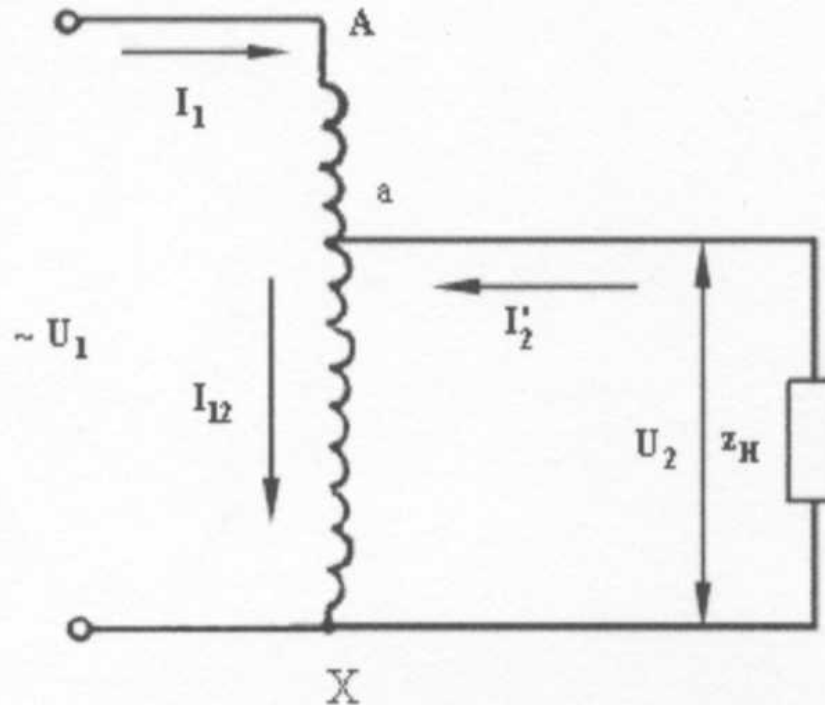
Трехобмоточный трансформатор с одной первичной и двумя вторичными обмотками



Обмотки трехобмоточного трансформатора располагают на стержне обычно concentрически, при этом целесообразнее двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичной, тогда первичной является обмотка 2, а вторичными — обмотки 1 и 3.

Автотрансформаторы

- Автотрансформатор — это такой вид трансформатора, в котором помимо магнитной связи между обмотками имеется еще и **электрическая связь**.



В автотрансформаторе часть витков в обмотке В.Н. используется в качестве обмотки Н.Н., т.е. в автотрансформаторе имеется всего лишь одна обмотка, часть которой (а X) принадлежит одновременно сторонам В.Н. и Н. Н.

- Обмотка w_{ax} одновременно является частью первичной обмотки и вторичной обмоткой. В этой обмотке проходит ток I_{12} . Для точки a запишем уравнение токов:

- $$I'_2 = I_1 + I_{12}$$

- или

$$I_{12} = I'_2 - I_1$$

- т. е. по виткам w_{ax} проходит ток I_{12} , равный разности вторичного I_2 и первичного I_1 токов. Если коэффициент трансформации автотрансформатора $k_A = w_{Ax} / w_{ax}$ немногим больше единицы, то токи I_1 и I_2 мало отличаются друг от друга, а их разность составляет небольшую величину. Это позволяет выполнить витки w_{ax} проводом уменьшенного сечения.

- Введем понятие *проходной мощности* автотрансформатора, представляющей собой всю передаваемую мощность $S_{пр} = U_2 I_2$ из первичной цепи во вторичную:
- $S_{пр} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_{э} + S_{расч}$.
- Здесь $S_{э} = U_2 I_1$, — мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную благодаря **электрической** связи между этими цепями.
- $S_{расч} = U_2 I_{12}$ расчетная мощность в автотрансформаторе.
- Расчетная мощность составляет лишь часть проходной. Это дает возможность для изготовления автотрансформатора использовать магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности.

- Средняя длина витка обмотки также становится меньше; следовательно, уменьшается расход меди на выполнение обмотки автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и электрические потери, а КПД автотрансформатора повышается.
- Таким образом автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), более высоким КПД, меньшими размерами и стоимостью. У автотрансформаторов большой мощности КПД достигает 99,7%.

Следовательно, в автотрансформаторе посредством магнитного потока передается только часть мощности, что дает возможность уменьшить поперечное сечение магнитопровода. Магнитные потери при этом также уменьшаются.

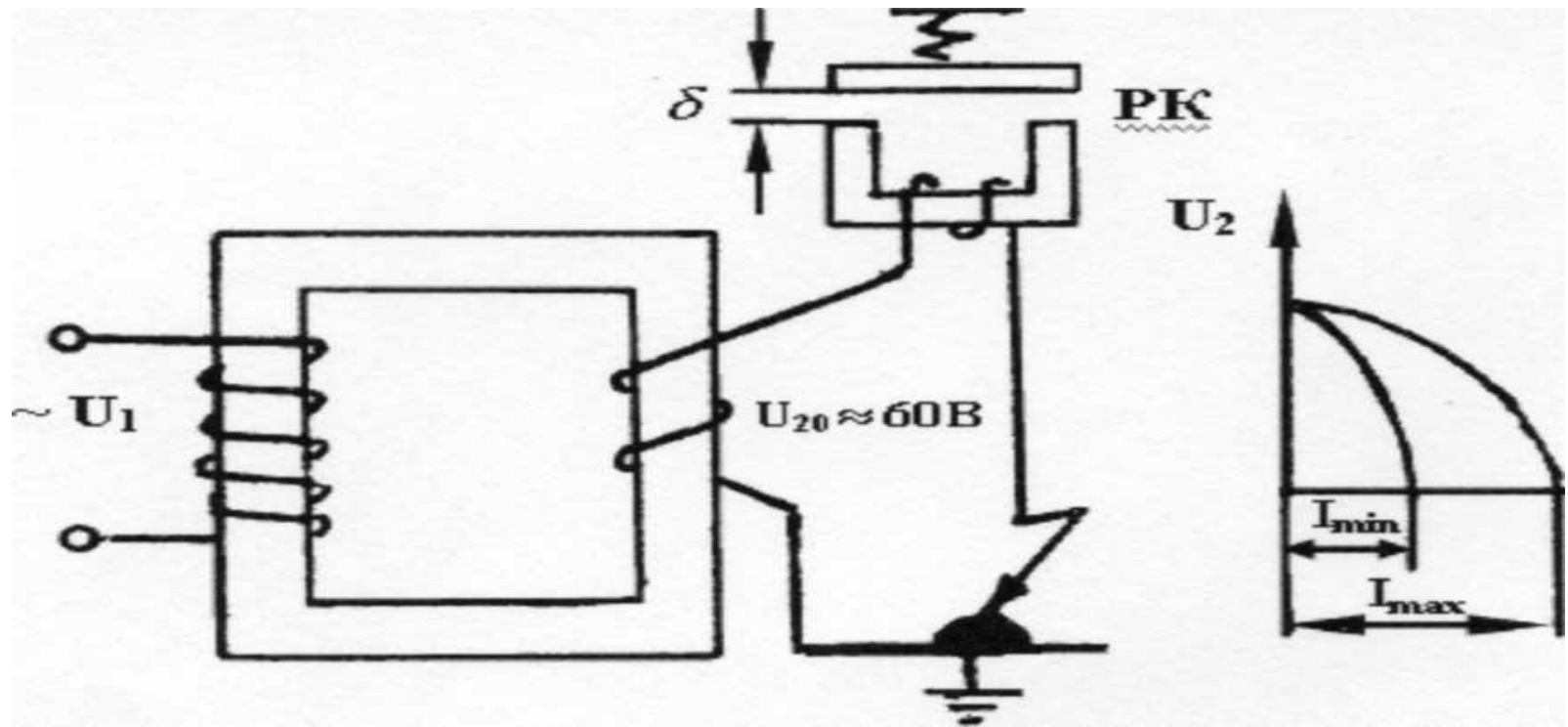
При меньшем поперечном сечении магнитопровода уменьшается средняя длина витка обмотки, следовательно, вновь уменьшается расход обмоточной меди и снижаются электрические потери.

Таким образом, автотрансформатор имеет преимущества перед трансформаторами, заключающиеся в меньшем весе, меньших размерах более высоком К.П.Д., меньшей стоимости и. т.д.

Однако эти достоинства имеют значение лишь при коэффициенте трансформации $k \leq 2$

ТРАНСФОРМАТОР ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

- Сварочный трансформатор представляет собой однофазный трансформатор, понижающий напряжение сети до 60-65 В (рис.). В рабочем режиме трансформатор находится близко к короткому замыканию. Чтобы величина тока не возрастала сверх допустимого значения, последовательно к нему включается реактивная катушка РК с раздвижным сердечником, в результате чего характеристика трансформатора становится круто падающей.



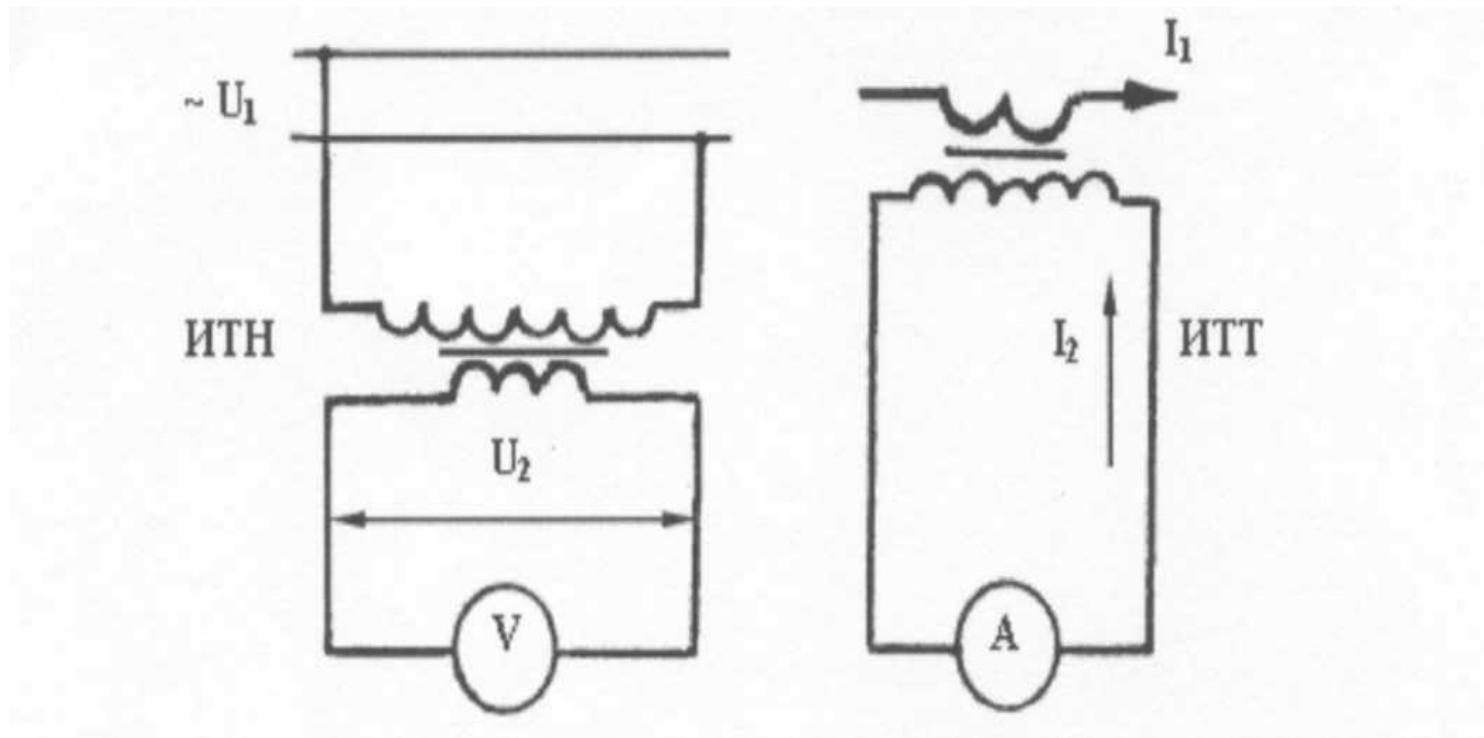
- Изменяя зазор δ , можно плавно менять сварочный ток.

Максимальное значение тока будет при $\delta_{\max}$ - Для безопасного обслуживания вторичная обмотка сварочного трансформатора заземляется.

-

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

- Эти трансформаторы применяются совместно с измерительными приборами для расширения их пределов измерения.



Измерительный трансформатор напряжения

- Измерительный трансформатор напряжения представляет собой понижающий трансформатор с таким отношением витков $W1/W2$, чтобы при любом значении первичного напряжения $U1$, вторичное напряжение было бы равно $U2 = 100 \text{ В}$. Во вторичную цепь включаются вольтметры, частотомеры, обмотки напряжения ваттметров, счетчиков и фазометров. Так как электрическое сопротивление этих приборов велико (порядка $1 \text{ } 000 \text{ Ом}$), то трансформаторы напряжения работают в режиме, **близком к холостому ходу**. Такой режим связан с большими магнитными потерями, а это, в свою очередь, приводит к увеличению размеров магнитопровода и устройству специального масляного охлаждения.

Измерительные трансформаторы тока

- Измерительные трансформаторы тока применяются для включения в сеть амперметров, обмоток тока ваттметров, счетчиков и фазометров.
- Первичная обмотка трансформатора тока выполняется из провода большого поперечного сечения и включается в цепь последовательно.
- Вторичная обмотка выполняется всегда на ток $I_2 = 5\text{А}$. Рабочий режим трансформатора тока близок к **короткому замыканию**, поэтому размеры магнитопровода у него значительно меньше, чем у трансформатора напряжения.

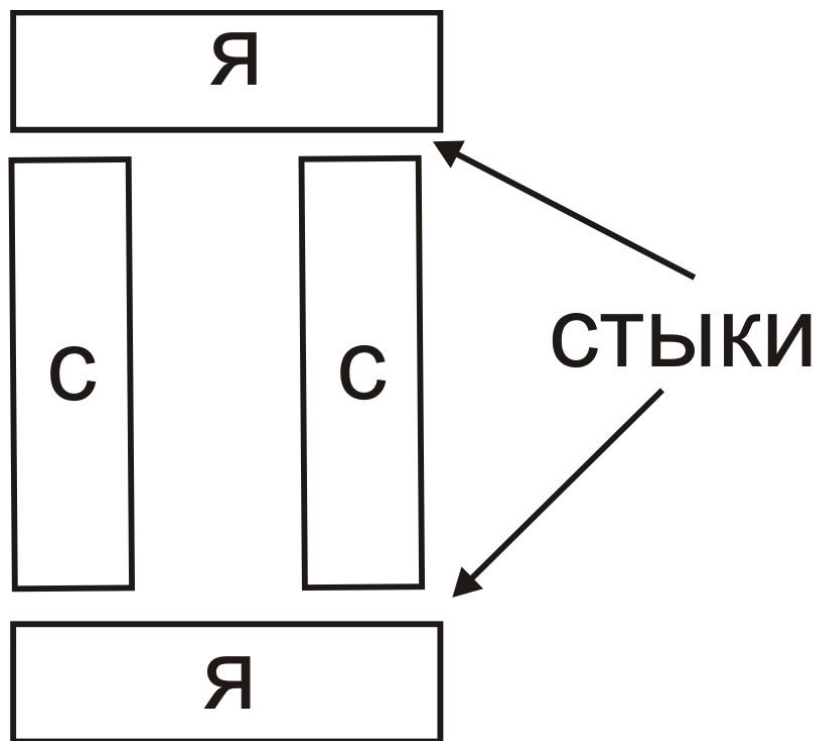
- .

- Для определения **напряжения** или **тока** в цепи необходимо показания приборов **умножить на коэффициент трансформации измерительных трансформаторов**.
- В целях безопасности нельзя оставлять вторичную обмотку трансформатора тока разомкнутой, если первичная включена в сеть. В этом режиме напряжение U_2 возрастает до нескольких тысяч вольт.
- Разновидностью измерительного трансформатора тока являются токоизмерительные клещи с разъемным магнитопроводом, где роль первичной обмотки выполняет сам провод, по которому течет измеряемый ток.

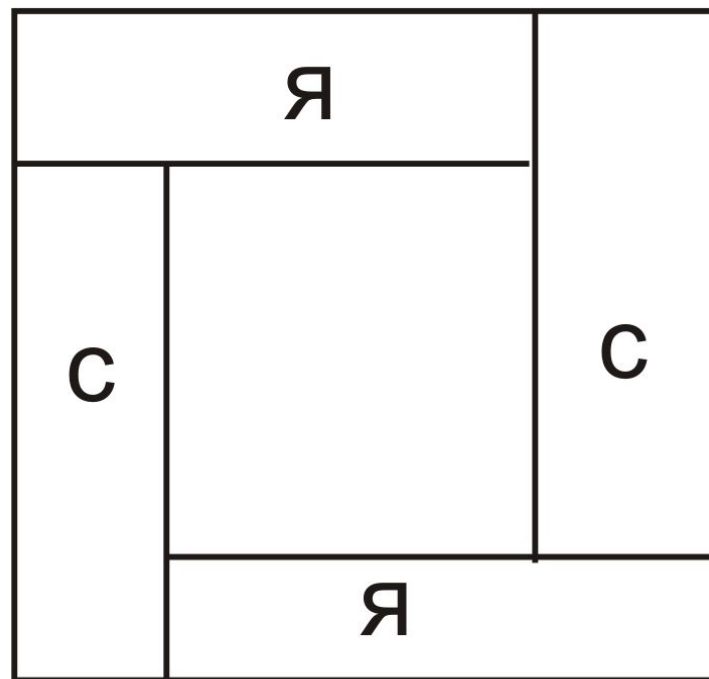
Основные конструктивные элементы силовых трансформаторов

- 1. *Магнитная система или магнитопровод*
- 2. *Обмотки трансформаторов*

Способы сочленения стержней с ярами: а) стыковые;
б) шихтованные

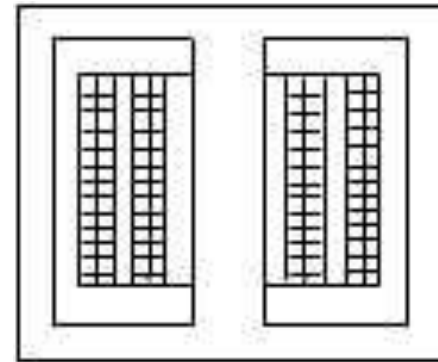
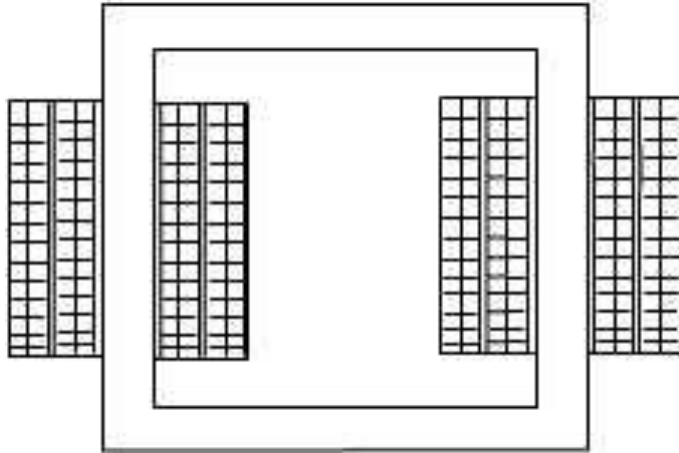


• а



б

В зависимости от взаимного расположения стержней, ярм и обмоток магнитопроводы разделяются на *стержневые* и *броневые*



- Стержневой однофазный трансформатор

Броневой однофазный трансформатор

- Стержневой трехфазный трансформатор

Броневой трансформатор трехфазный

Поперечные сечения стержней трансформаторов

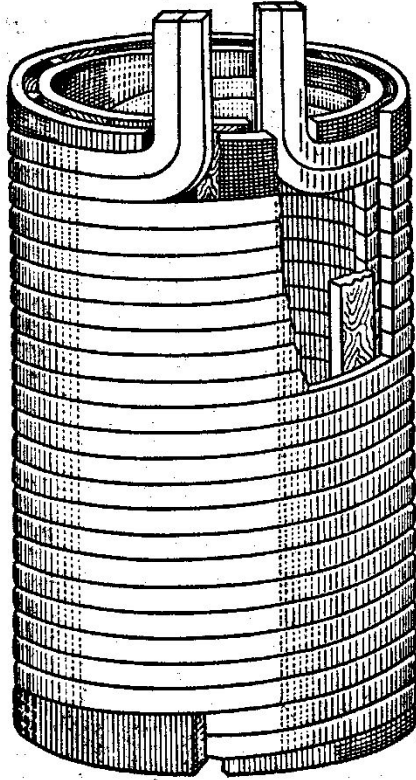
Обмотки трансформаторов

- По способу расположения на стержне обмотки трансформатора подразделяются на:
- **концентрические** – одну поверх другой
- **чередующиеся** – в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня

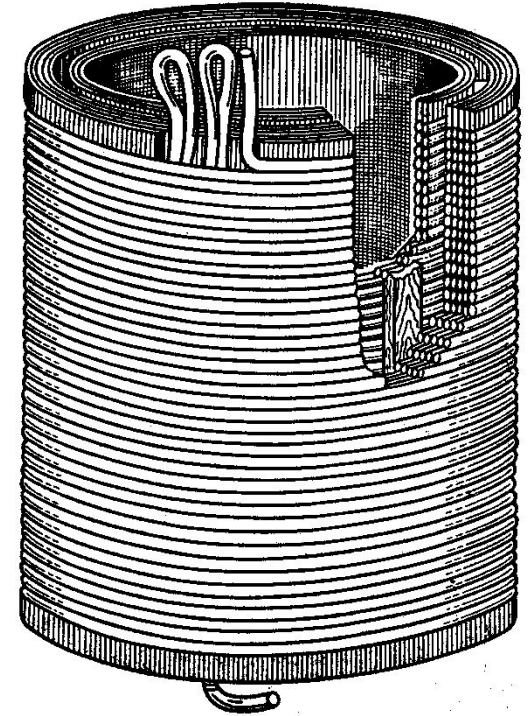
- a) б)

- а) с concentрическими обмотками; б) с чередующимися обмотками

- По характеру намотки **концентрические** обмотки можно подразделить на:
 - - *цилиндрические,*
 - - *винтовые,*
 - - *спиральные.*



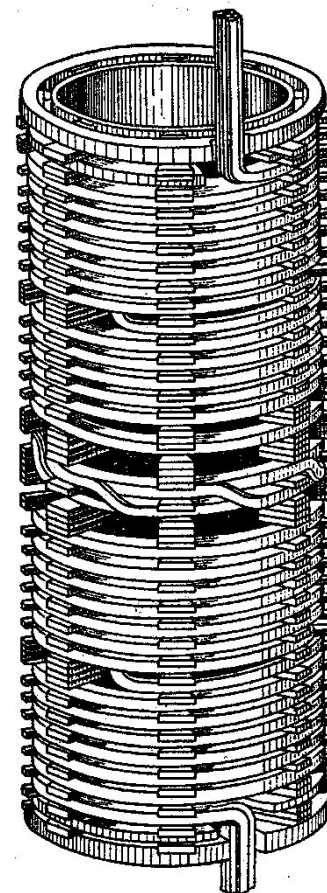
– а)



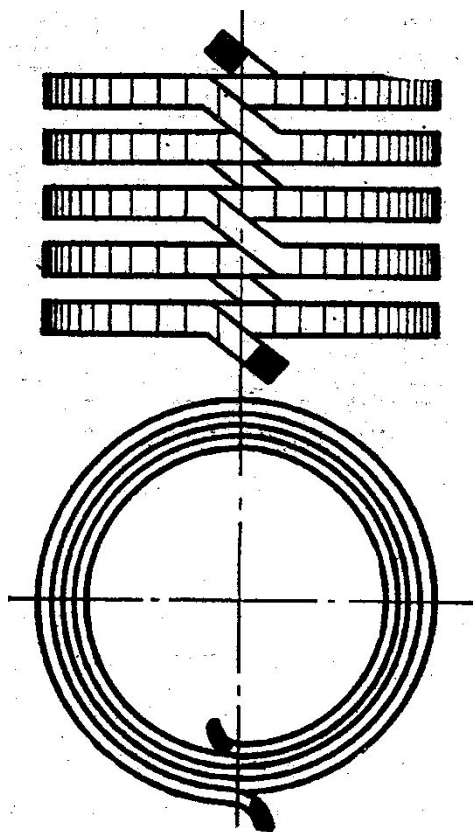
б)

- Общий вид **цилиндрической** обмотки: а) двухслойной из прямоугольного провода; б) многослойной из круглого провода

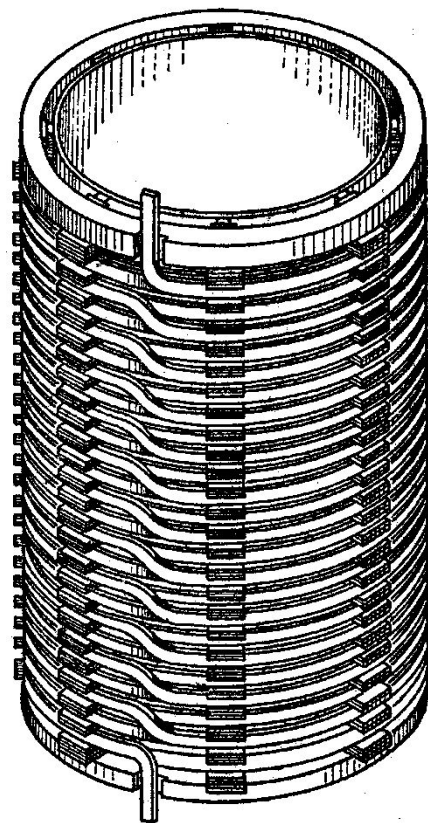
Схема намотки винтовой
обмотки



Общий вид одноходовой винтовой
параллельной обмотки



- Непрерывная спиральная
- катушечная обмотка



Общий вид непрерывной
спиральной катушечной обмотки