

# **СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ**

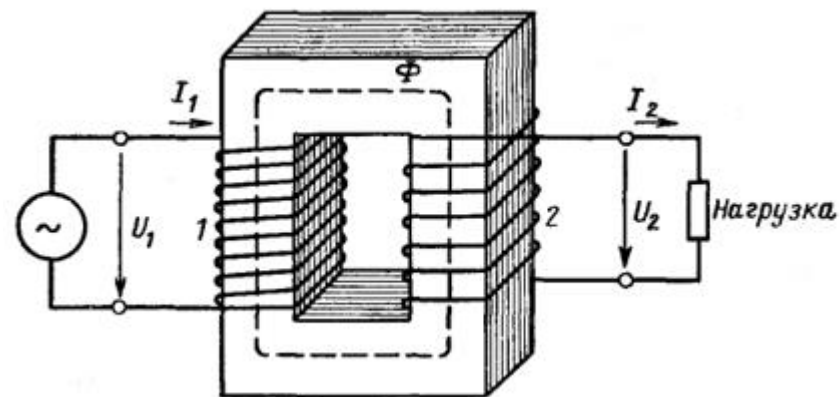
# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Принцип действия и конструкция

# Термины и определения

**Трансформатор** – электромагнитное статическое устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения.

- обмотки  $w_1, w_2$  (магнитная связь)
- магнитопровод (сердечник) / воздушный тр-р
- первичная обмотка
- вторичная обмотка
- двухобмоточный / многообмоточный тр-р
- однофазный / трехфазный / многофазный тр-р



- повышающий тр-р
- понижающий тр-р
- силовые тр-ры
- специальные тр-ры (сварочные, измерительные, для дуговых печей, для автоматики, для радиотехники)

# Принцип действия трансформатора

Первичная обмотка:

- источник переменного напряжения  
 $U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow \Phi \rightarrow E_1 (=ew_1), E_2 (=ew_2)$
- $U_1 \approx E_1$  («противоЭДС»)

Вторичная обмотка:

- потребители (нагрузка)  $E_2 \rightarrow I_2; U_2 = I_2 Z_{\text{н}}$

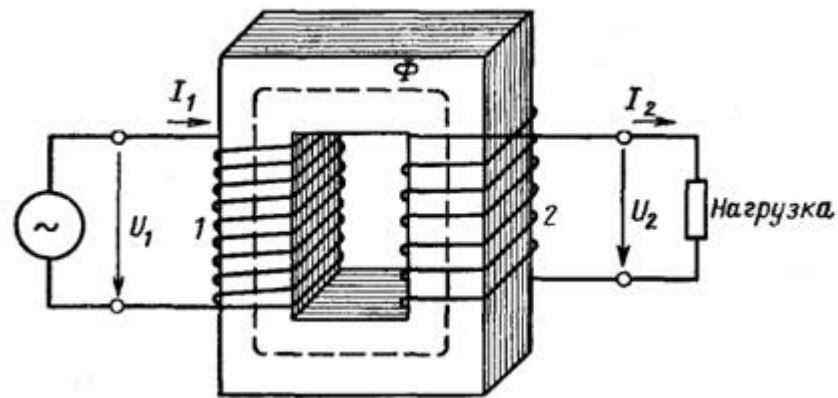
Т.к.  $w_1 \neq w_2, E_1 \neq E_2, U_1 \neq U_2, I_1 \neq I_2$

(изменение параметров электроэнергии)

В сети постоянного тока

$U_{\text{п}} \rightarrow I_{\text{п}} \rightarrow \Phi_{\text{п}} \rightarrow E_1 = 0, I_1 = U_1 / r_1$  – очень большой!

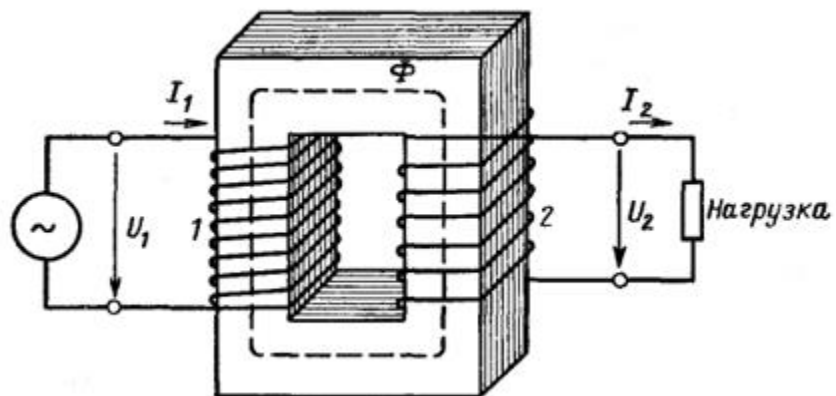
$E_2 = 0, I_2 = 0$  (нет передачи энергии)



# Конструкция трансформатора

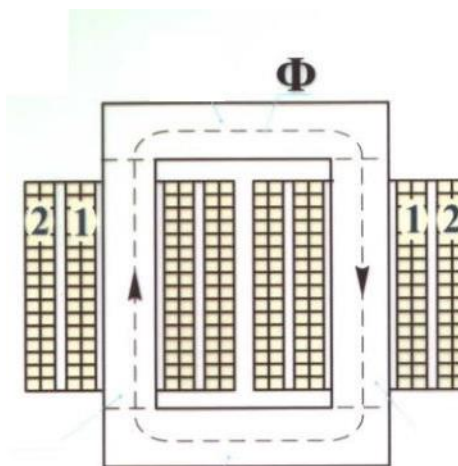
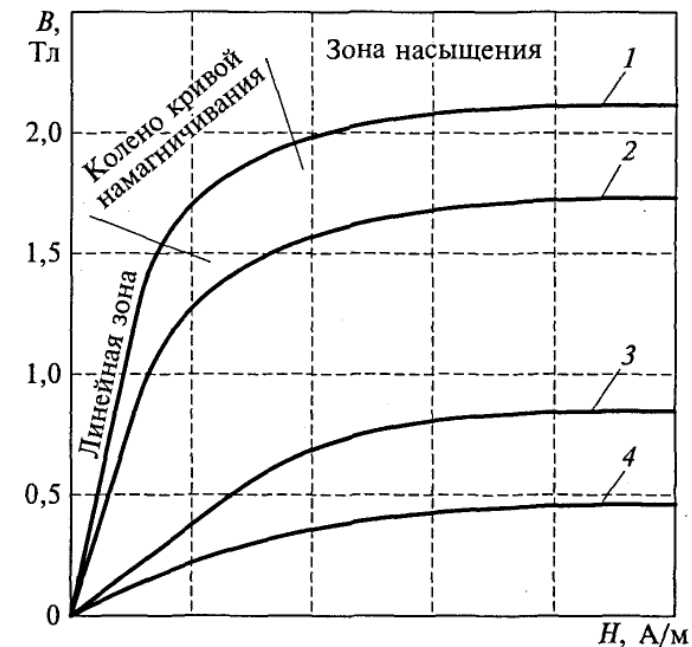
## Магнитопровод

- шихтованный сердечник (для  $f = 50$  Гц  $\Delta = 0,35-0,5$  мм)
- электротехническая сталь

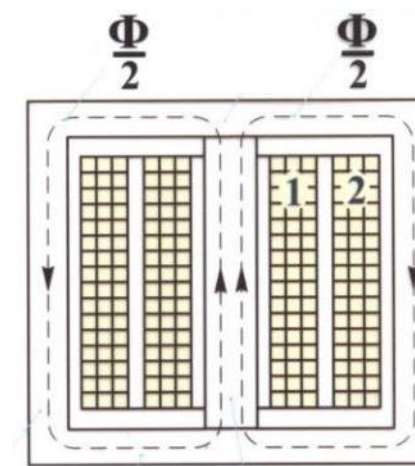


- стержень
- ярмо

1. холоднокатанная сталь
2. горячекатанная сталь
3. конструкционная сталь
4. чугун



стержневой магнитопровод

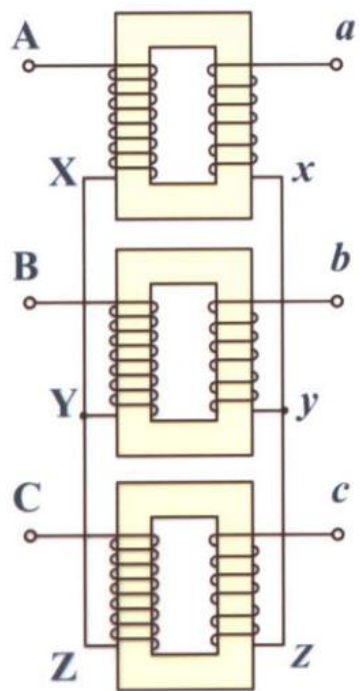


броневой магнитопровод

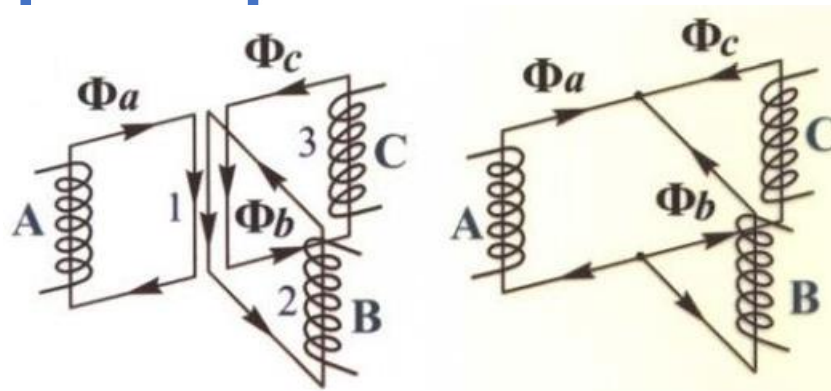
# Конструкция трансформатора

## Магнитопровод

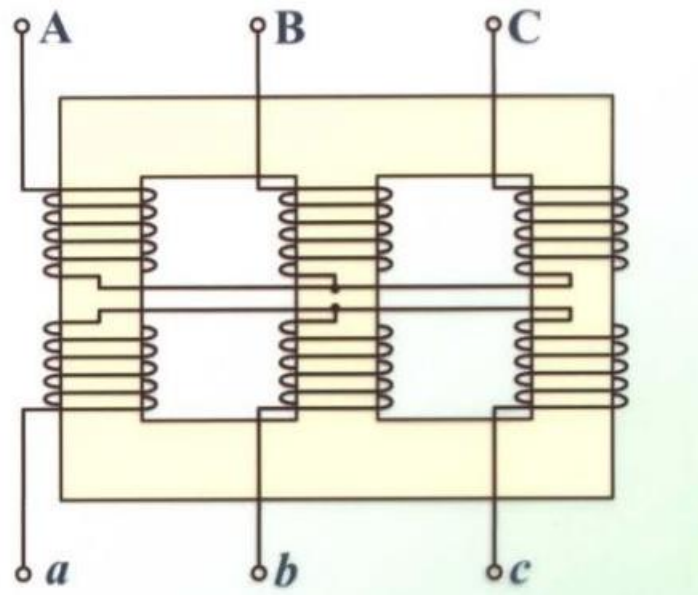
- Трехфазный трансформатор



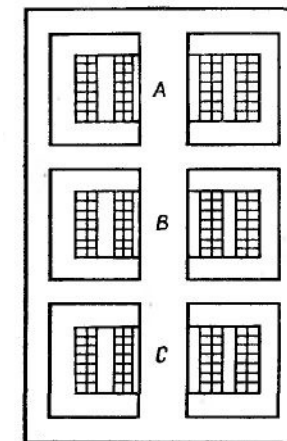
3-фазная группа  
(групповой тр-р)



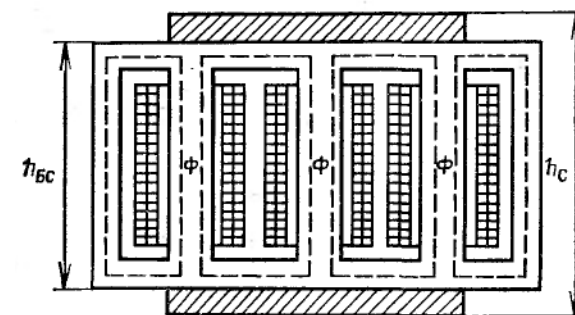
На стержне –  
обе обмотки  
одной фазы



3-фазный стержневой тр-р



3-фазный броневой тр-р

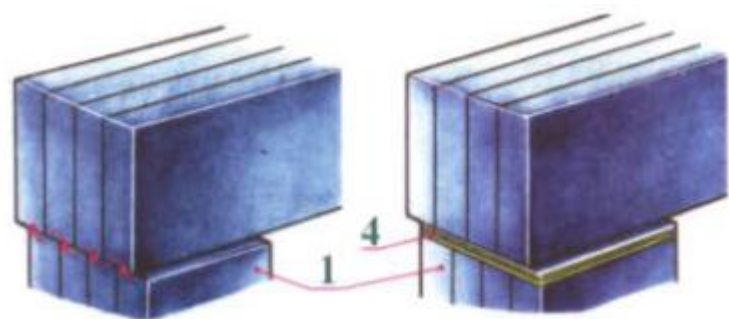


бронь-стержневой тр-р

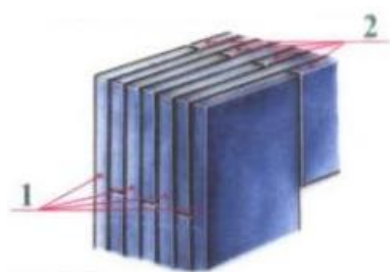
# Конструкция трансформатора

## Магнитопровод

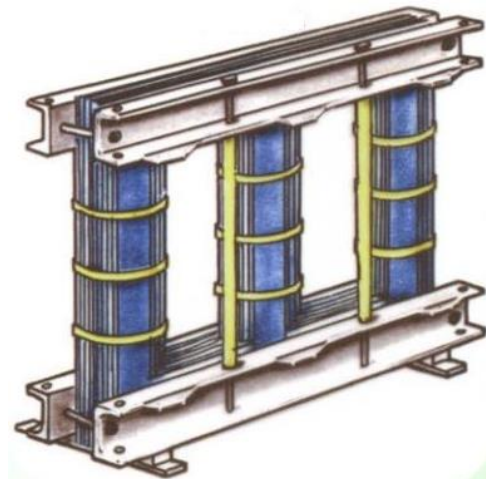
- шихтованный сердечник



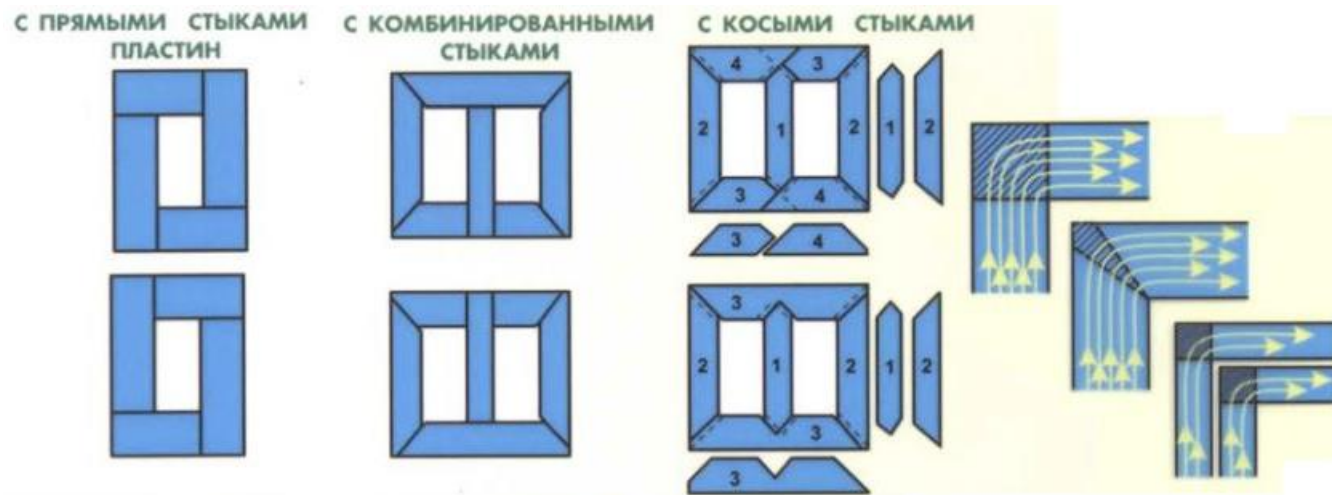
Стыковое соединение



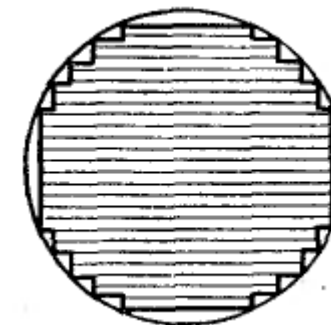
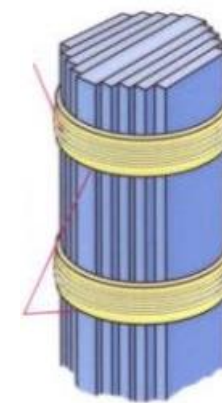
Сборка впереplet



Остов трансформатора



Схемы шихтовки

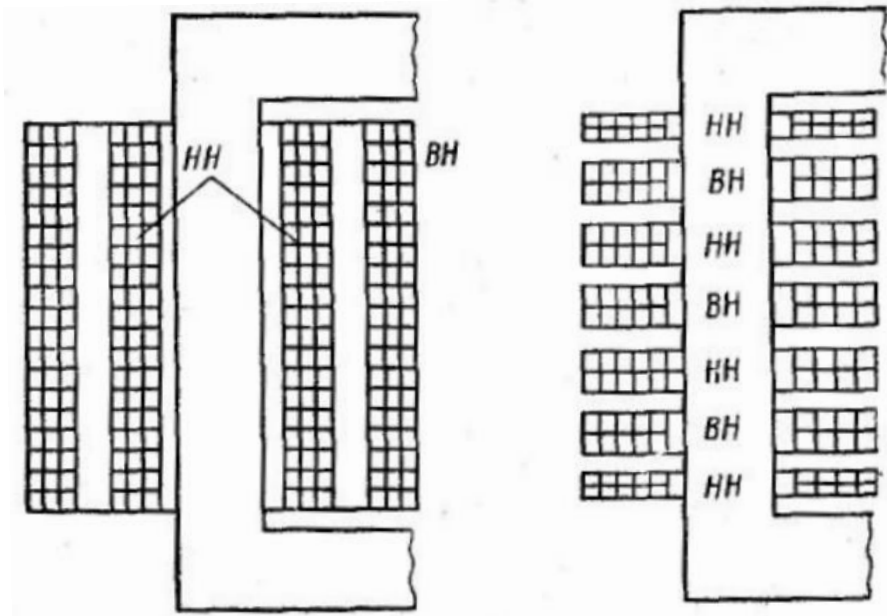


Сечение стержня / ярма

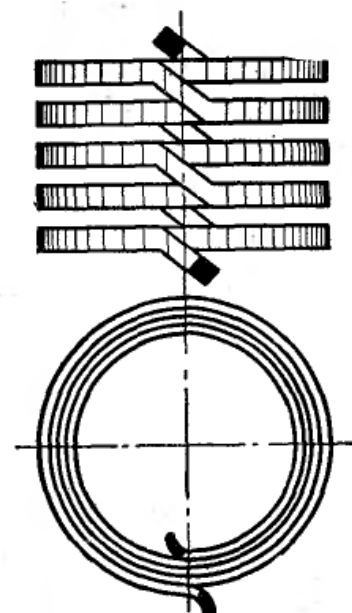
# Конструкция трансформатора

## Обмотки

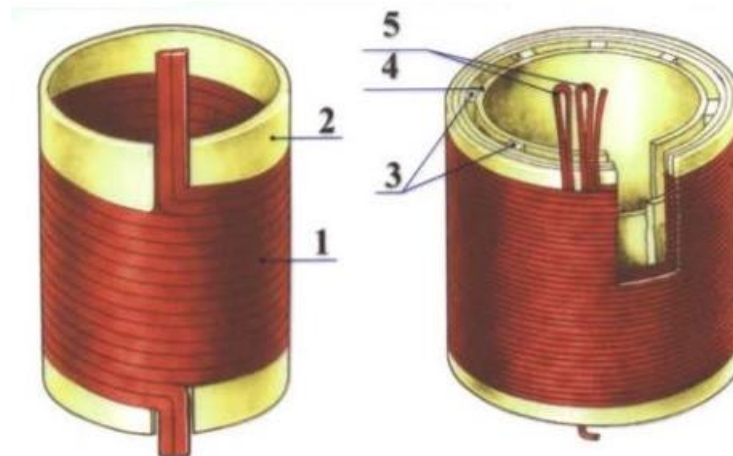
- медь / алюминий



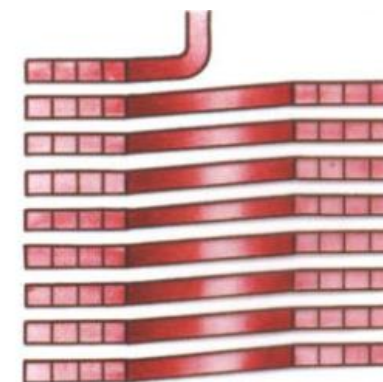
концентрические / чередующиеся обмотки



спиральная катушечная обмотка



цилиндрическая обмотка



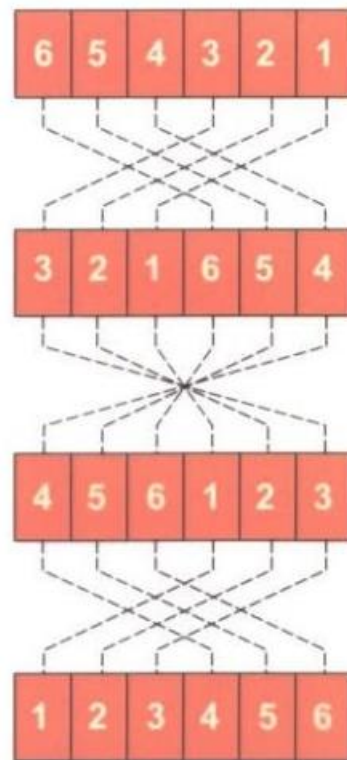
винтовая обмотка

# Конструкция трансформатора

## Обмотки



винтовая обмотка



Транспозиция

выравнивание  $r$  и  $x$  параллельных ветвей

→ равномерное распределение тока

$$r = \rho \frac{l}{S}$$

$$x = \omega L \sim \Lambda(\Psi_{\sigma})$$

ОБЩАЯ ТРАНСПОЗИЦИЯ



ГРУППОВАЯ ТРАНСПОЗИЦИЯ



# Конструкция трансформатора

**Изоляция** – диэлектрик для защиты от электрического пробоя между проводниками (определяется классом напряжения)

- **Главная**

(изоляция обмотки от остова, бака, других обмоток)

- **Продольная**

(между витками, слоями, катушками обмотки)

В трансформаторе:

- электроизоляционные промежутки (воздух/масло)
- прокладки, шайбы, цилиндры

Классы изоляционных материалов по нагреваемости

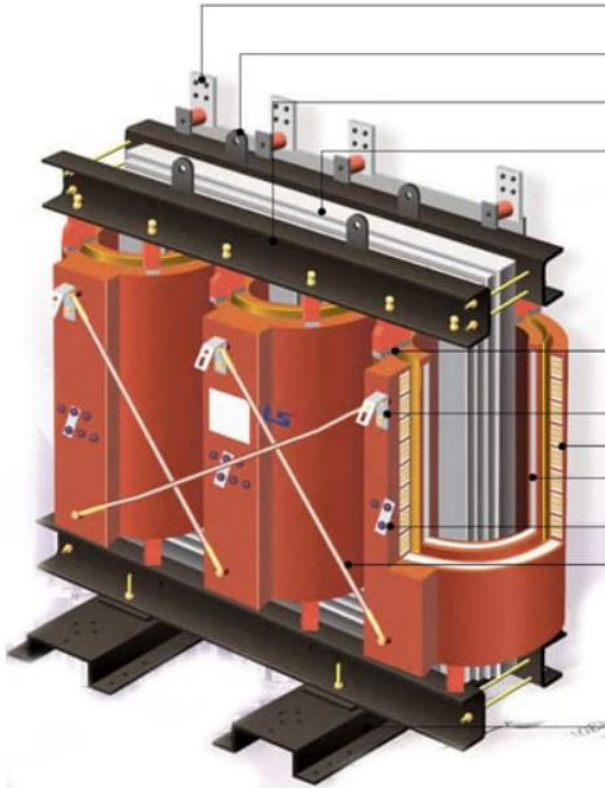
	<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
Мах допустимая температура, °C	90	105	120	130	155	180	>180

Трансформаторное масло, дерево, картон – класс *A*

Генераторы, двигатели: слюда с пропиткой – класс *F*

# Конструкция трансформатора

## Конструктивные части



Сухой трансформатор



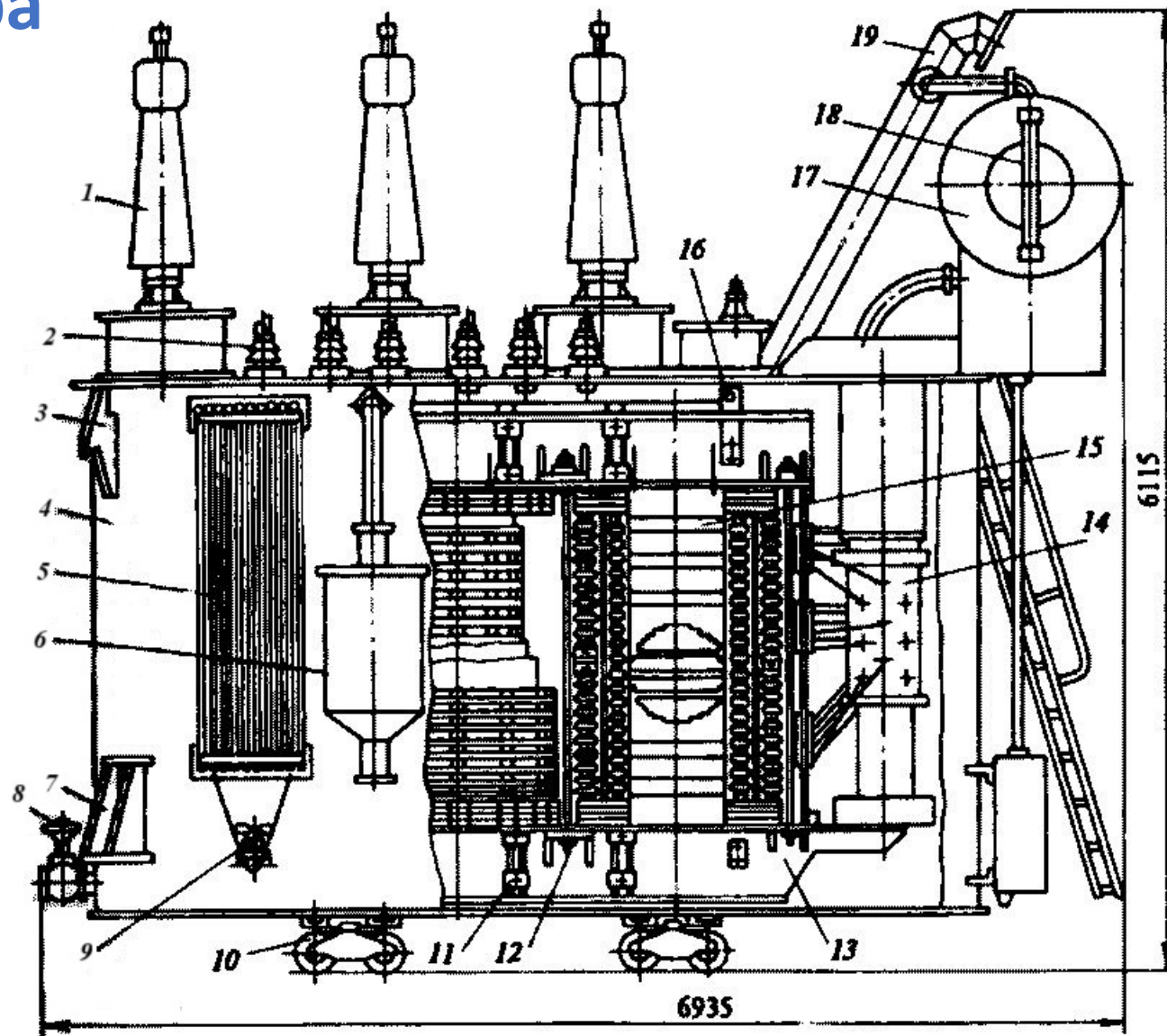
Масляный трансформатор

- Трансформаторное масло
- диэлектрик
  - хладагент

# Конструкция трансформатора

3-фазный двухобмоточный трансформатор мощностью 40,000 кВА на 110 кВ с РПН

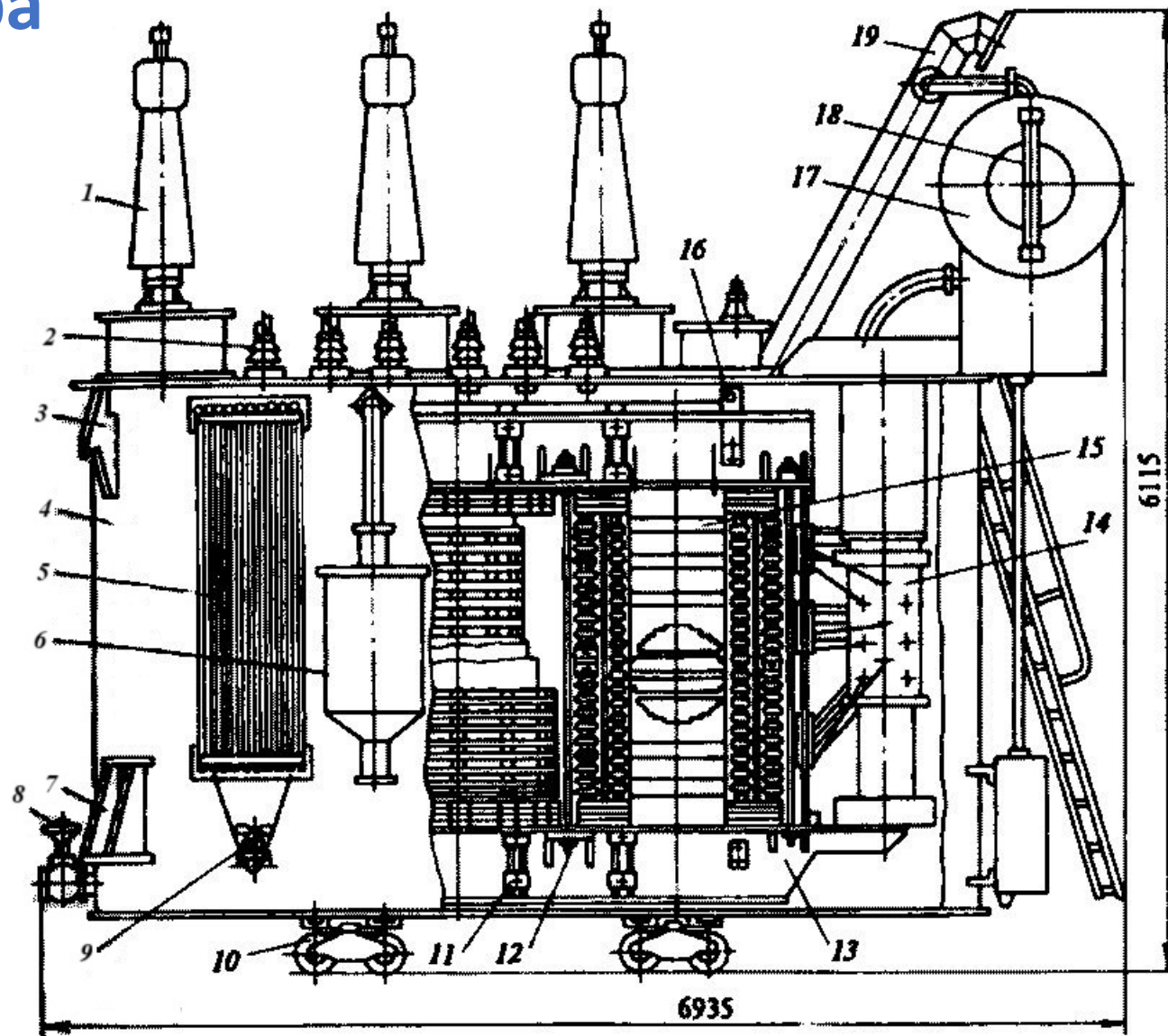
- 1 – ввод ВН 110 кВ
- 2 – ввод НН 10 кВ
- 3 – крюк для подъема трансформатора
- 4 – бак
- 5 – радиатор
- 6 – фильтр термосифонный
- 7 – скоба для подъема домкратом
- 8 – вертикальный кран для слива масла
- 9 – вентилятор
- 10 – каток
- 11 – полубандажи стяжки ярма
- 12 – вертикальная стяжная шпилька остова
- 13 – ярмовая балка



# Конструкция трансформатора

3-фазный двухобмоточный трансформатор мощностью 40,000 кВА на 110 кВ с РПН

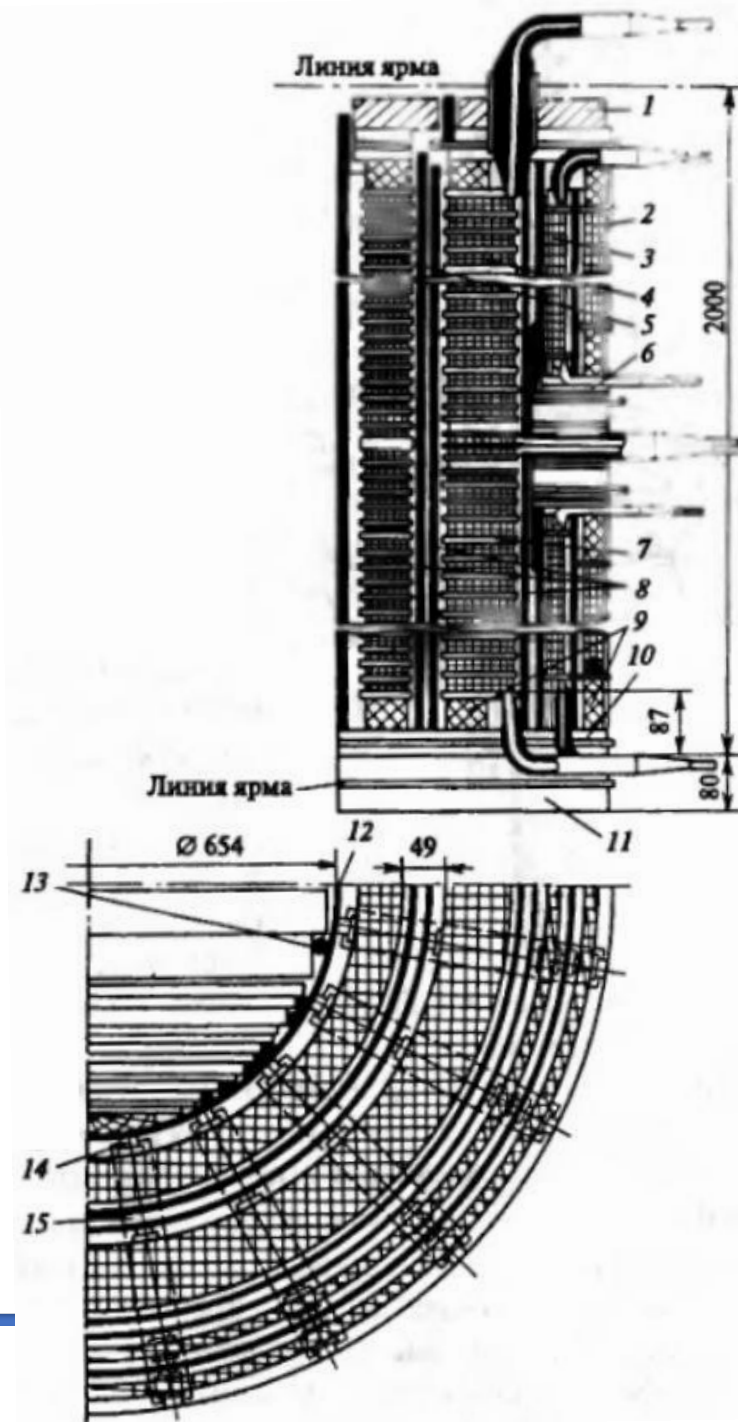
- 14 – устройство переключения ответвлений обмотки ВН
- 15 – бандажные стяжки стержня
- 16 – пластина с проушиной для подъема активной части
- 17 – расширитель
- 18 – маслоуказатель
- 19 – предохранительная труба



# Конструкция трансформатора

## Обмотки трансформатора

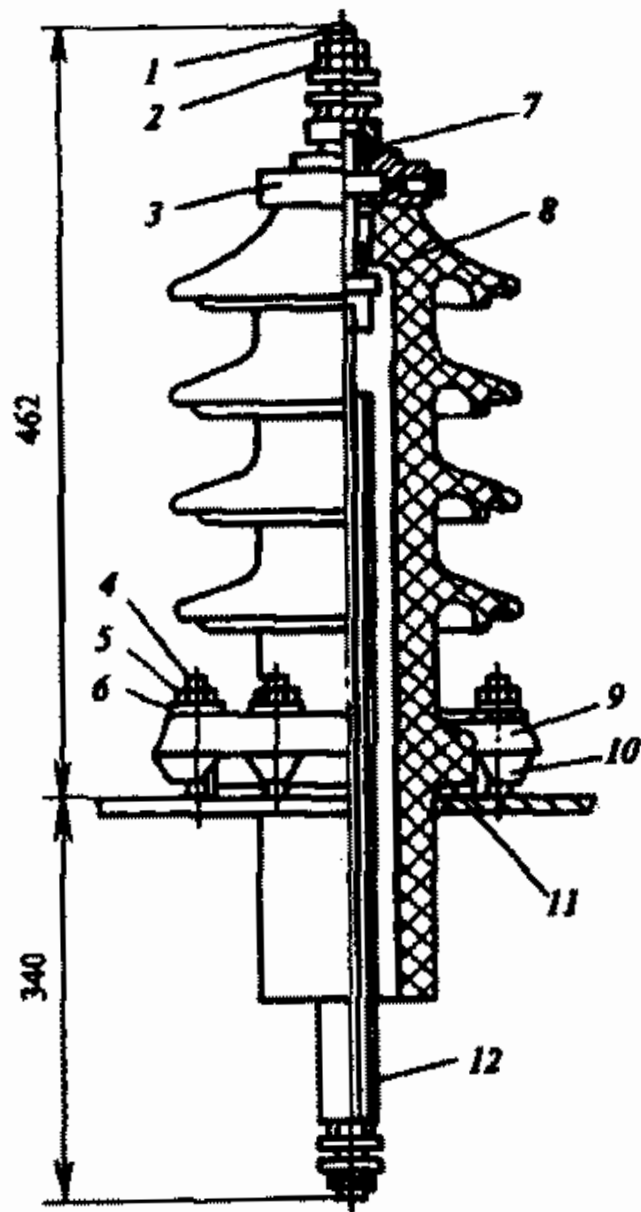
- 1 – стальное прессующее кольцо
- 2 – обмотка тонкого регулирования
- 3 – обмотка грубого регулирования
- 4 – обмотка ВН
- 5 – обмотка НН
- 6 – угловая изоляционная шайба
- 7 – межкатушечные прокладки
- 8 – изоляционные цилиндры
- 9 – опорные кольца из электроизоляционного картона
- 10 – ярмовая изоляция из электроизоляционного картона
- 11 – уравнивательная изоляция
- 12 – деревянная планка
- 13 – деревянный стержень
- 14, 15 – рейка из электроизоляционного картона



# Конструкция трансформатора

**Ввод на напряжение 35 кВ  
(при токе до 250 А)**

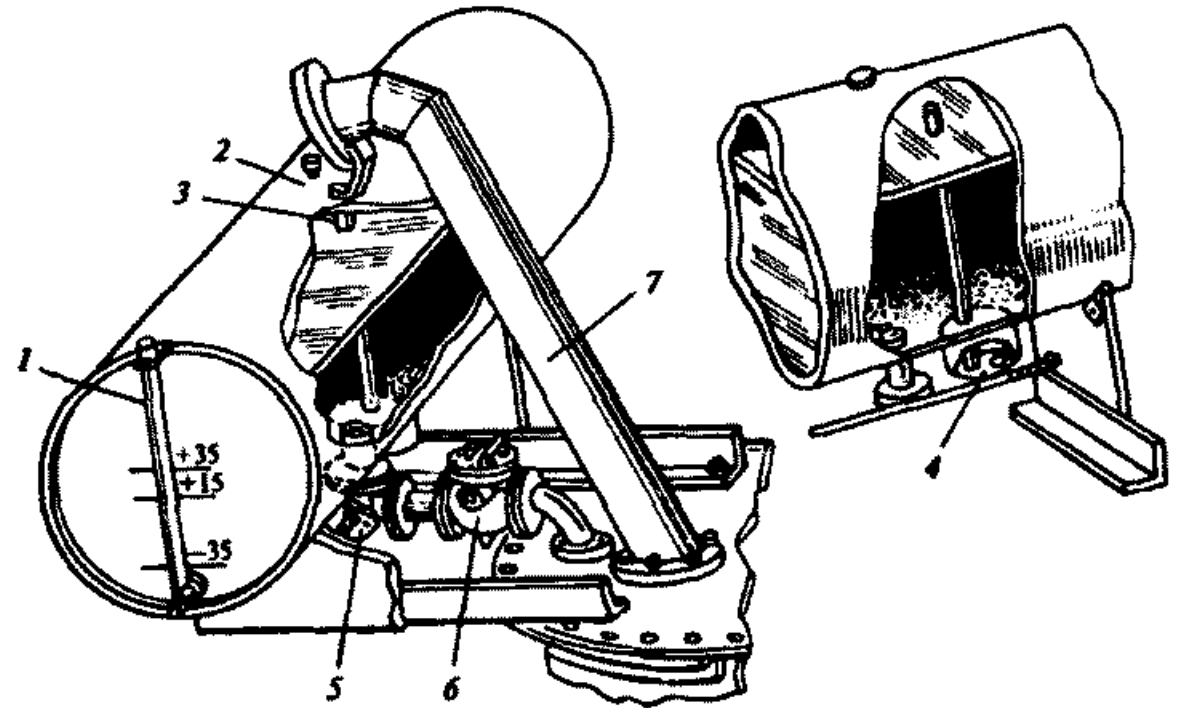
- 1 – медная шпилька
- 2 – латунная гайка
- 3 – латунный колпак
- 4,5,6 – стальные шпилька, гайка, шайба
- 7 – резиновое кольцо
- 8 – фарфоровый изолятор
- 9 – стальной штампованный фланец
- 10 – кулачок
- 11 – резиновое уплотнение
- 12 – токоведущая шпилька с изолирующей трубкой



# Конструкция трансформатора

## Арматура бака трансформатора

- 1 – указатель уровня масла
- 2 – пробка для заливки масла
- 3 – трубка для свободного обмена воздуха
- 4 – грязеотстойник
- 5 – кран для отсоединения расширителя
- 6 – газовое реле
- 7 – выхлопная труба



# Паспортные данные

Номинальное напряжение

$U_{1н}; U_{2н}$  при ХХ (линейное напряжение)

Номинальный ток

$I_{1н}; I_{2н}$  (линейный ток)

Номинальная мощность

• однофазный тр-р  $S_{н} = U_{1н} I_{1н}$

• трехфазный тр-р  $S_{н} = \sqrt{3} U_{1лн} I_{1лн}$

(также  $S_{н} = 3 U_{1фн} I_{1фн}$ )

можно считать  $S_1 = S_2 = S_{н}$

Паспортные данные:

- номинальная полная мощность, ВА
- номинальные напряжения, В
- номинальные токи, А
- частота сети, Гц
- схема и группа соединения обмоток
- напряжение короткого замыкания, %
- режим работы (продолжительный / кратковременный)
- полная масса, кг

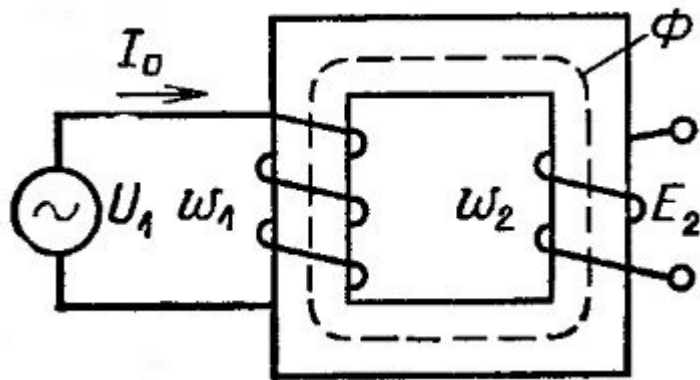
# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Холостой ход трансформатора

# Холостой ход трансформатора

Режим холостого хода:  $U_1$  от сети,  $I_2 = 0$

Однофазный тр-р (аналогично любой фазе 3-ф)



$$U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow F_1 (= I_1 w_1) \rightarrow \Phi \begin{cases} \Psi_1 (= \Phi w_1) \rightarrow E_1 \\ \Psi_2 (= \Phi w_2) \rightarrow E_2 \end{cases}$$

$I_1$  – ток ХХ  $I_0$  (реактивная сост.  $I_{0p} \rightarrow$  поток  $\Phi$ )

Основная часть потока – в магнитопроводе ( $\mu_{ст} \approx 1000$ , потоки рассеяния учтем позже)

Если  $U_1$  синусоидально, то и поток  $\sin$

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (\omega = 2\pi f_1)$$

Мгновенные значения ЭДС обмоток

$$e_1 = -\frac{d(w_1 \Phi)}{dt} = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = -2\pi f_1 w_1 \Phi_m \cos \omega t;$$

$$e_2 = -\frac{d(w_2 \Phi)}{dt} = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = -2\pi f_1 w_2 \Phi_m \cos \omega t.$$

или  $e_1 = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$

$$e_2 = E_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

ЭДС отстает от  $\Phi$   
на  $\pi/2$

Действующее значение ЭДС

$$E_1 = \frac{2\pi f_1 w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = \frac{2\pi f_1 w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f_1 w_2 \Phi_m.$$

# Холостой ход трансформатора

Коэффициент трансформации

$$k_{\tau} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

т.к.  $U_1 \approx E_1$ , а на ХХ  $U_2 = E_2$ ,  
на практике определяют

$$k_{\tau} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}$$

Принято:  $U_1, E_1, w_1$  – обмотка ВН

$U_2, E_2, w_2$  – обмотка НН (т.е.  $k_{\tau} > 1$ )

Для 3-фазного тр-ра:

- обычно используют  $k_{\tau}$  для линейных  $U$
- можно выразить  $k_{\tau}$  через  $w_1$  и  $w_2$  (с учетом схемы соединения)

Например, для схемы  $\Delta/Y$

$$k_{\tau\Delta Y} = \frac{U_{\Delta 1}}{U_{Y 2}} = \frac{U_{\phi 1}}{\sqrt{3}U_{\phi 2}} = \frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}$$

Тр-р на ХХ потребляет активную мощность  
– на покрытие потерь мощности

Основные потери мощности:

- электрические (в обмотках)
- магнитные (в магнитопроводе)

Электрические потери ( $I^2r$ ) малы ( $I_1 = I_0, I_2 = 0$ )

Можно считать  $P_0$  – только магнитные потери

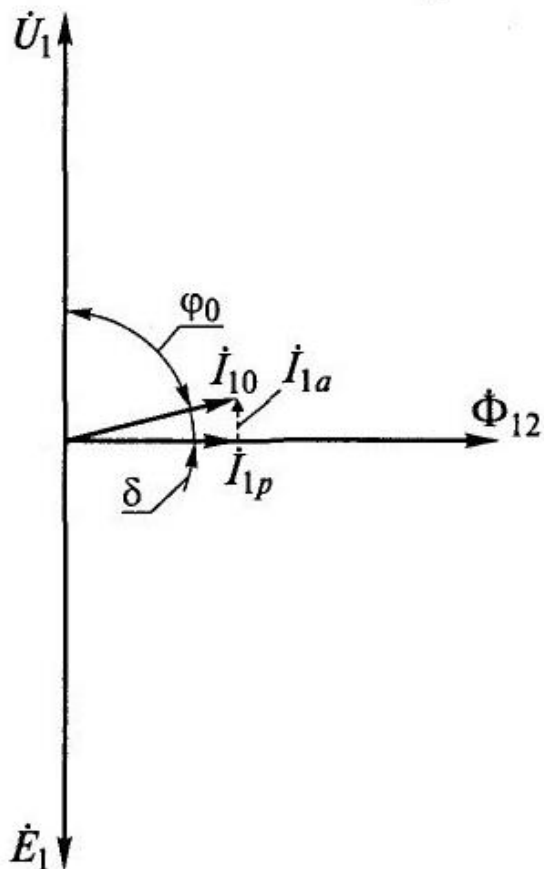
- потери на гистерезис (перемагничивание)
- потери на вихревые токи (в магнитопроводе)

Потери → активная составляющая тока  $I_0$

Ток холостого хода  $I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}$

# Холостой ход трансформатора

Векторная диаграмма тр-ра при ХХ



- поток  $\Phi$
- реактивный ток  $I_{0p}$
- ЭДС (отстает на  $\pi/2$ )
- активный ток  $I_{0a}$  (мал)
- напряжение  $U_1 \approx E_1$
- (угол  $\varphi_0 \approx \pi/2$ )

Потери  $P_0$ , ток  $I_0$  – собственное потребление (желательно минимизировать)

- электротехническая сталь
  - большая маг. проницаемость  $\mu$
  - малая ширина петли гистерезиса
- шихтованный магнитопровод (тонкие изолированные листы стали)

Современные трансформаторы:

- $P_0 = 0,1...2\%$  (от  $P_{1н}$ )
- $I_0 = 0,5...10\%$  (от  $I_{1н}$ )

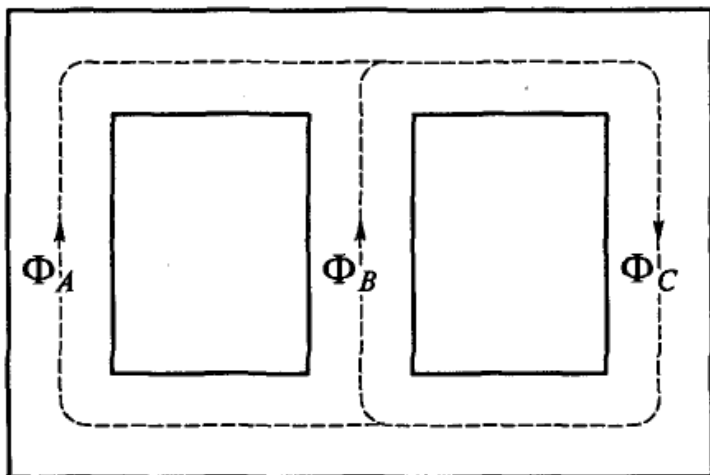
# Холостой ход трансформатора

Опыт холостого хода

Особенность трехфазного трансформатора

Токи XX фаз  $A$  и  $C$  равны и превышают ток  $B$

Причина – магнитная несимметрия  
плоского стержневого магнитопровода



Длина линии потока для стержня  $B$  короче  
При одинаковых  $B$  и  $H$  в магнитопроводе  
магнитное сопротивление потоку  $\Phi_B$  меньше  
→ намагничивающий ток фазы  $B$  меньше

Разница невелика

В качестве  $I_0$  используют среднее значение  
токов  $I_{0A}$ ,  $I_{0B}$ ,  $I_{0C}$

# ТРАНСФОРМАТОРЫ

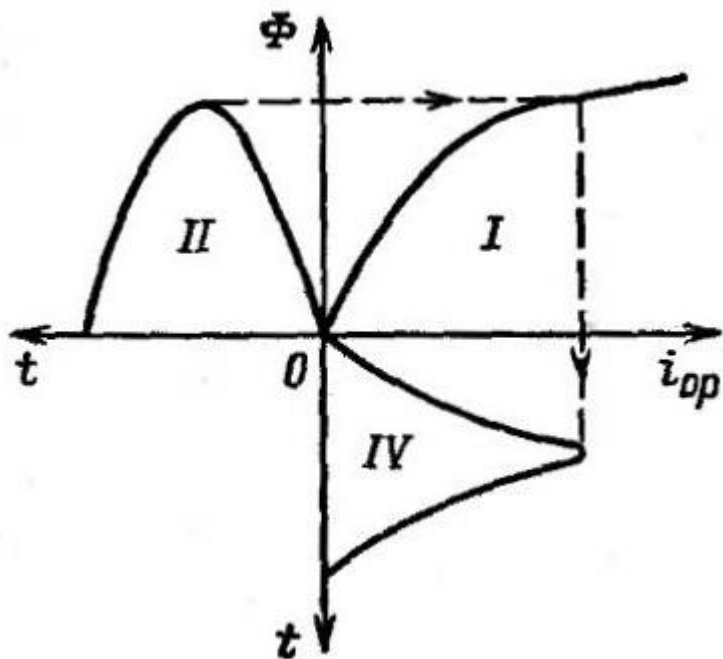
Явления при намагничивании  
магнитопровода

# Явления при намагничивании магнитопровода

Нелинейная кривая намагничивания  $B(H)$

→ нарушение пропорциональности между  $\Phi$  и  $I_{op}$

Связь между  $\Phi$  и  $i_{op}$  → характеристика намагничивания [сердечника]

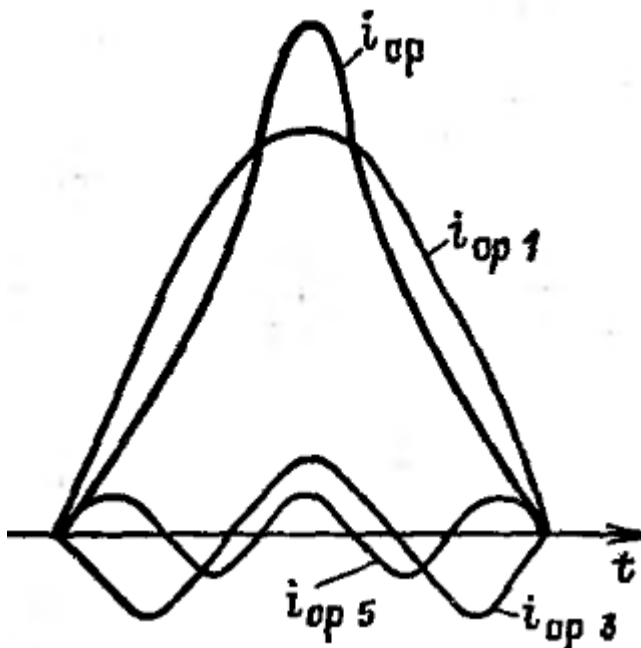


## Однофазный трансформатор

Рассмотрим питание от  $\sin$  источника  $U_1$

→  $\Phi$  также  $\sin$

Для каждого мгновенного значения потока  $\Phi$  по характеристике намагничивания найдем мгновенные значения тока  $i_{op}$  → несинусоидально!



При разложении в гармонический ряд – нечетные гармоники (частота  $f_v = \nu f_1$ , период  $2\tau/\nu$ )

Действующее значение тока

$$I_{op} = \sqrt{I_{op1}^2 + I_{op3}^2 + I_{op5}^2 + \dots}$$

Активная составляющая тока при этом  $\sin$  → несимметрия кривой  $i_0$

# Явления при намагничивании магнитопровода

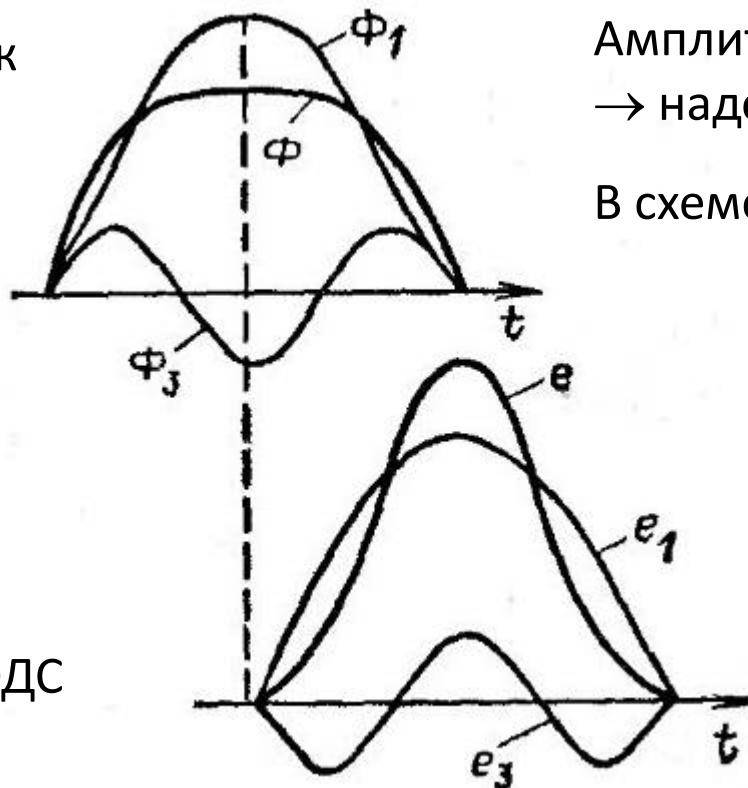
Трехфазный трансформатор

Случай 1. Схема соединения Y/Y

3-фазная система sin напряжений –  
фазовый сдвиг осн. гармоник  $120^\circ$

Но фазовый сдвиг 3 гармоник  
 $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$  (синфазны)  
(для всех  $\nu$  кратных 3)

При схеме Y токи 3 гарм.  
протекать не могут  
→ намагничивающий ток **sin**  
[по характеристике  
намагничивания найдем  $\Phi$ ]  
→ поток **nesin** (уплощение)  
Гармоники  $\Phi$  → гармоники ЭДС



ЭДС от  $\Phi_\nu$  пропорциональна  $\Phi_{m\nu}$  и  $f_\nu = \nu f_1$

Величина 3 гармоника ЭДС

$$\frac{E_{m3}}{E_{m1}} = \frac{f_3 \Phi_{m3}}{f_1 \Phi_{m1}} = 3 \frac{\Phi_{m3}}{\Phi_{m1}}$$

Амплитуда ЭДС может опасно повышаться  
→ надо усиливать изоляцию (удорожание)

В схеме Y линейные ЭДС = разности фазных  
т.к. 3 гармоника синфазны →  
в линейных ЭДС нет 3 гармоника  
(sin  $E_{1л}$  уравновешивают sin  $U_1$ )

# Явления при намагничивании магнитопровода

Трехфазный трансформатор

Случай 1. Схема соединения Y/Y

Групповой трансформатор:

3-я гармоника потока в каждой фазе

замыкается по своему сердечнику

→ наводит большую  $E_{3\phi}$  (до 40...50%  $E_{1\phi}$ )

Бронестержневой тр-р – аналогично

Стержневой трансформатор:

3 гармоники потока не могут замыкаться в магнитопроводе

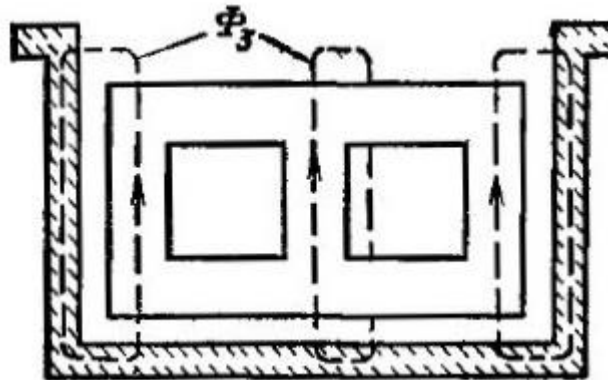
( $\sum\Phi_1 = 0$ , но  $\sum\Phi_3 \neq 0$ )

→ магнитное сопротивление

большое →  $\Phi_3$  маленький →

ЭДС  $E_{3\phi}$  составляет 5...7%  $E_{1\phi}$

В стержневом тр-ре  $\Phi_3$  замыкаются по конструктивным элементам (бак)  
→ нагрев → растут потери  $P_0$



ГОСТ не предусматривает использование схемы Y/Y

# Явления при намагничивании магнитопровода

## Трехфазный трансформатор

### Случай 2. Схема соединения $\Delta/Y$

Для  $\Delta$  в первичной цепи  $U_{1л} = U_{1ф}$

→ фазные  $U \sin$  → потоки  $\Phi$  тоже  $\sin$

→ нечетные гармоники  $I_{0ф}$

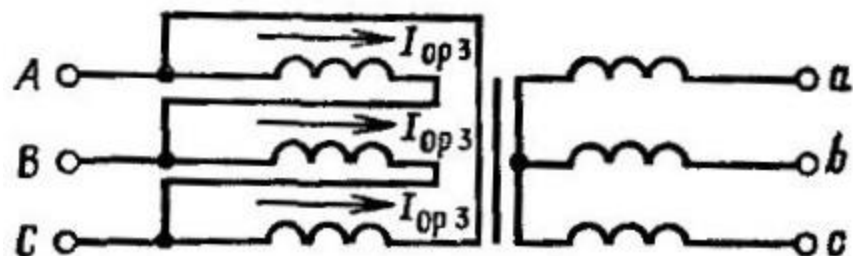
т.к. 3 гармоники совпадают по фазе,

они замыкаются по фазам в  $\Delta$

(доп.нагрев)

Но в лин.токе  $I_{0л}$  нет 3 гармоники

( $I_{0A} = I_{0фA} - I_{0фC}$  и т.д.)



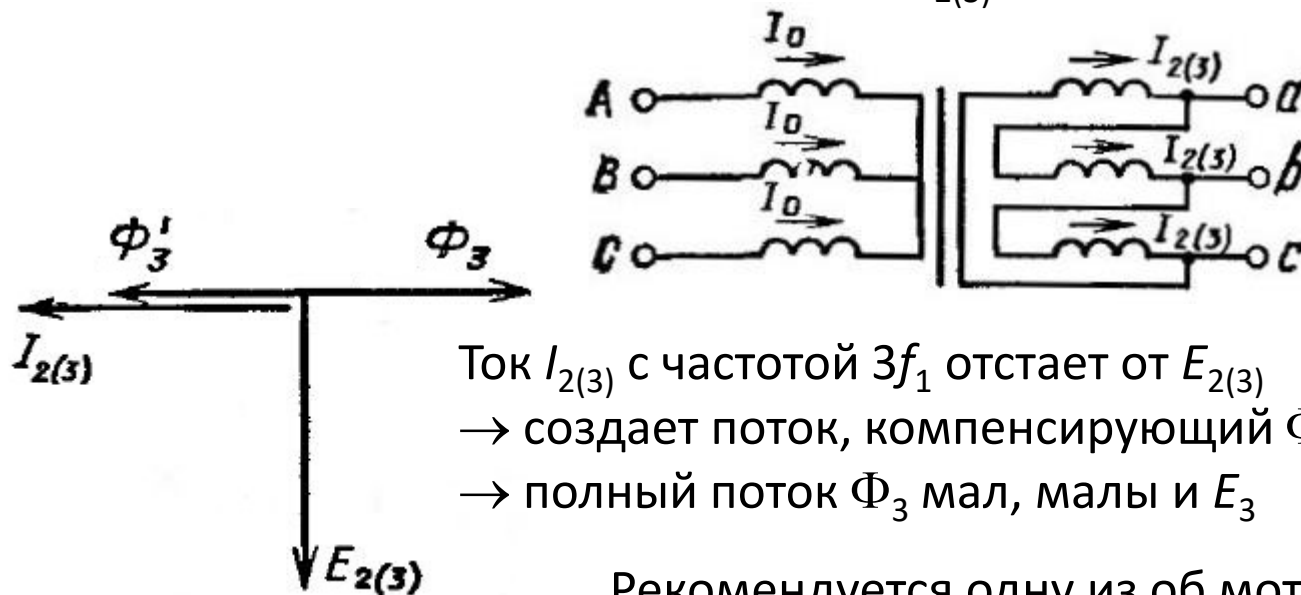
### Случай 3. Схема соединения $Y/\Delta$

При схеме  $Y$  ток  $I_{0р} \sin$  → гармоники  $\Phi$

→ гармоники  $E_1$  и  $E_2$

3 гармоника  $E_2$  складывается в фазах  $\Delta$

→ там циркулируют токи  $I_{2(3)}$



Ток  $I_{2(3)}$  с частотой  $3f_1$  отстает от  $E_{2(3)}$   
→ создает поток, компенсирующий  $\Phi_3$   
→ полный поток  $\Phi_3$  мал, малы и  $E_3$

Рекомендуется одну из обмоток  
включать по схеме  $\Delta$

# Явления при намагничивании магнитопровода

Трехфазный трансформатор

*Случай 4.*

При использовании схемы  $Y_n$  также образуется контур для замыкания токов 3 гармоника (нулевой провод)

→ в кривых  $\Phi$  и ЭДС нет 3 гармоника

Но в нулевом проводе –  $\Sigma$  токов 3 гарм. с частотой  $3f_1$  → помехи в соседних линиях

Еще одно явление при намагничивании – шум

Причина шума – магнитострикция (изменение формы и размера листов стали под действием переменного поля)

Частота шума –  $2f_1$

Для снижения шума – стягивание сердечников (бандаж)

# Явления при намагничивании магнитопровода

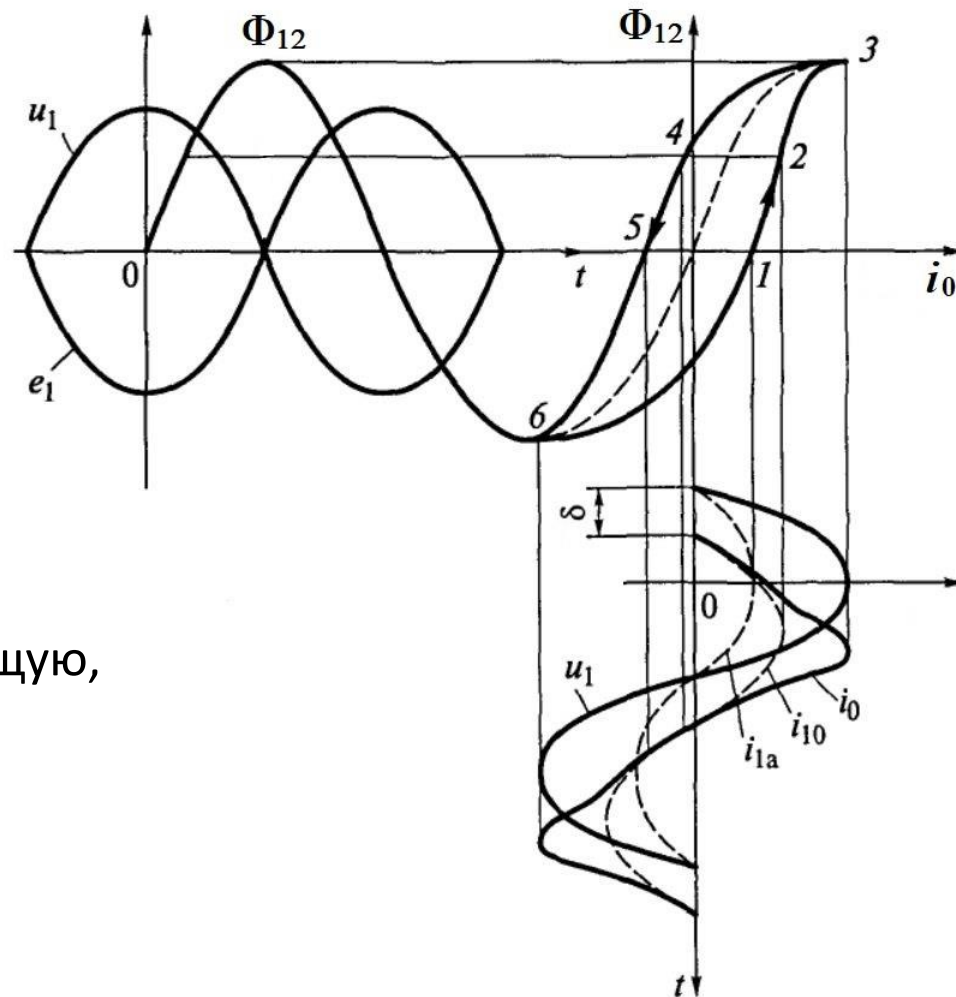
Наличие гистерезиса в кривой намагничивания стали  $B(H)$

Рассмотрим процесс намагничивания на ХХ с учетом ненулевой ширины петли гистерезиса

- Источник питания  $u_1$ , противоЭДС  $e_1$ , отстающая от потока  $\Phi_{12}$  на  $90^\circ$ ,  $\Phi_{12} = 0$  при  $t=0$
- Кривая намагничивания стали  $B = f(H) \rightarrow \Phi = f(i_0)$
- т. 1,2,3,4,5  $\rightarrow$  кривая тока холостого хода  $i_0$
- $i_{10}$  – основная гармоника тока  $i_0$
- Т.к. при  $\Phi_{12} = 0$   $i_0 \neq 0$  (т. 1 и 5), кривая тока  $i_0$  сдвинута по фазе относительно  $u_1$  на угол  $\delta < 90^\circ$
- Т.е. ток  $i_0$  имеет не только реактивную составляющую, но и активную ( $i_{1a}$ , совпадающая с  $u_1$  по фазе)

$$i_{10} = I_{1m} \sin(\delta + \omega t) = I_{1m} \sin \delta \cos \omega t + I_{1m} \cos \delta \sin \omega t$$

$$= I_{1ma} \cos \omega t + I_{1mp} \sin \omega t = i_{1a} + i_{1p}$$



# Явления при намагничивании магнитопровода

Наличие гистерезиса в кривой намагничивания стали  $B(H)$

- Реактивная составляющая тока  $i_0$  создает поток  $\Phi_{12}$  (намагничивающий ток)
- Активная составляющая тока  $i_0$  несет активную мощность на покрытие потерь (потери на гистерезис)

Потери на гистерезис пропорциональны ширине петли гистерезиса

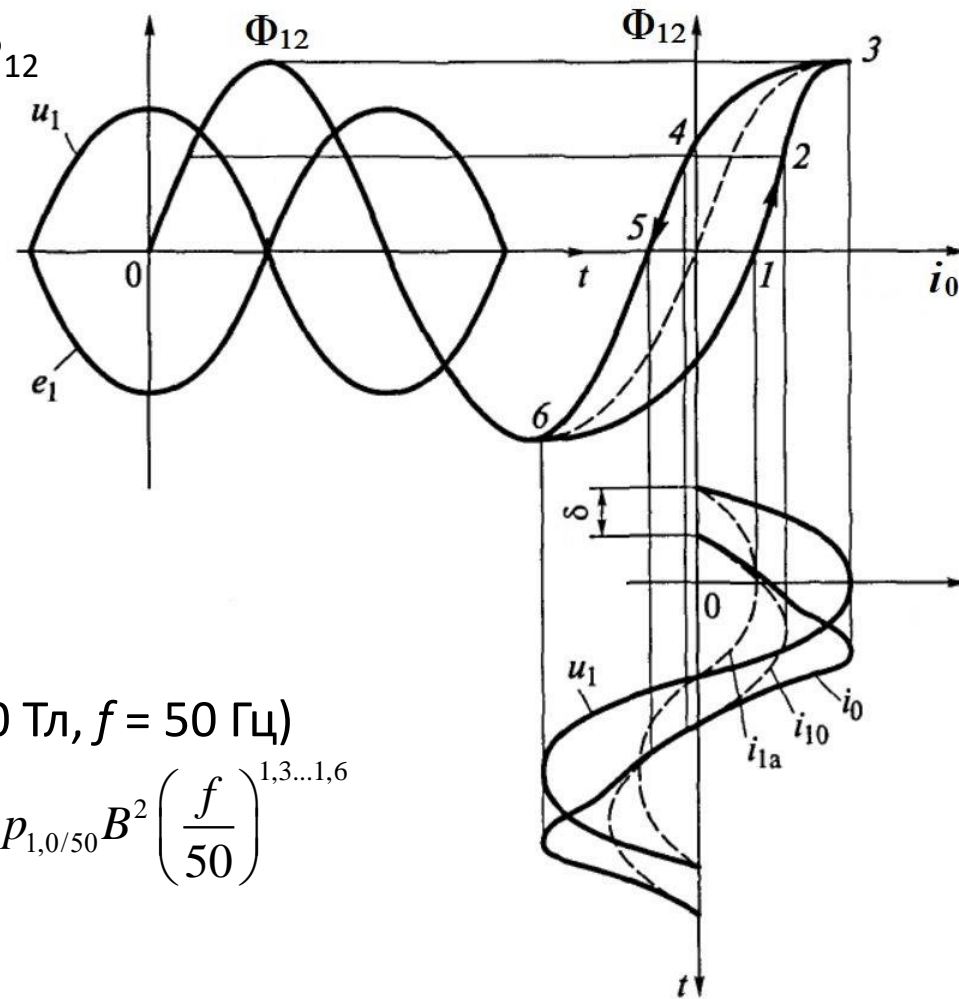
Также есть потери на вихревые токи, но они меньше при шихтовке сердечника

Потери в стали – свойство материала

В каталоге – удельные потери  $p_{1,0/50}$  Вт/кг (при  $B = 1,0$  Тл,  $f = 50$  Гц)

Для реального тр-ра удельные потери в стали  $P_{ст} = p_{1,0/50} B^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3...1,6}$

Для всего тр-ра потери в стали  $P_{ст} = p_{ст} G \cdot k_{доб}$



# ТРАНСФОРМАТОРЫ

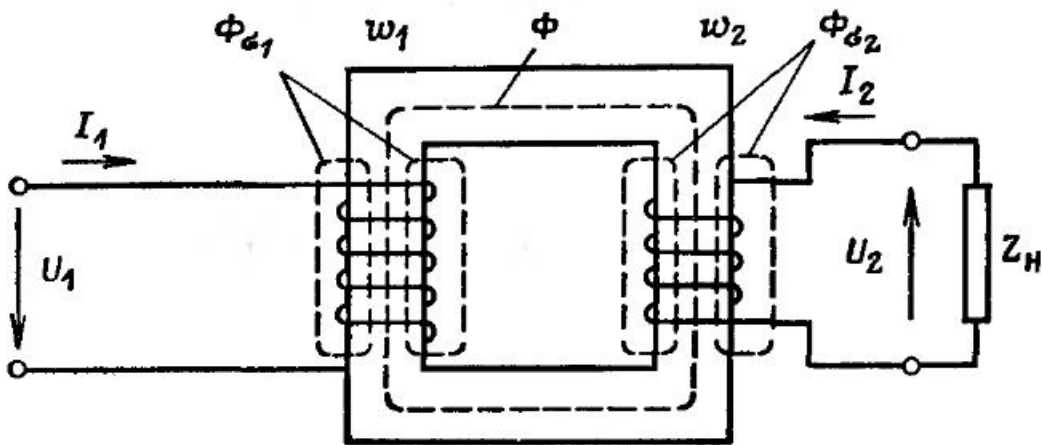
Работа трансформатора под  
нагрузкой

# Работа трансформатора под нагрузкой

Однофазный тр-р (фаза трехфазного тр-ра)

$Z_H \rightarrow$  под действием  $E_2$  протекает  $I_2 \rightarrow$  возрастает  $I_1$   
Тр-р отдает энергию в нагрузку, отбирая ее из сети  
 $\rightarrow$  «режим нагрузки»

$I_1 \rightarrow$  МДС  $F_1 \rightarrow$  магнитный поток  $\Phi_1$   
 $I_2 \rightarrow$  МДС  $F_2 \rightarrow$  магнитный поток  $\Phi_2$



Правило Ленца: ток  $I_2$  создает поток  $\Phi_2$ , противодействующий исходному  $\Phi_1$

Но если результирующий  $\Phi$  уменьшится, то снизится  $E_1$  и при том же  $U_1$  возрастет ток  $I_1$

Результирующий магнитный поток остается неизменным вплоть до номинальной нагрузки  $I_{2H}$

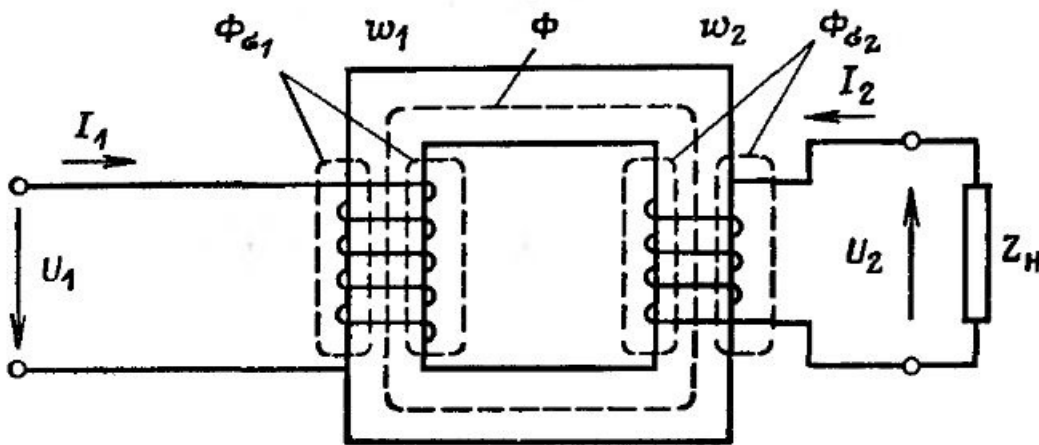
# Работа трансформатора под нагрузкой

Магнитный поток замыкается «в основном» по стали магнитопровода  
 $\mu_{ст}$  превышает  $\mu_0$  в  $10^3$  раз  $\rightarrow$  0,1% потока замыкается по воздуху  
(уд.проводимость проводника превышает уд.проводимость диэлектрика в  $10^{16}$  раз)

Результирующий  
магнитный поток:

- поток взаимоиндукции  $\Phi$ 
  - сцеплен с  $w_1$  и  $w_2$
  - наводит  $E_1$  и  $E_2$
  - в магнитопроводе

- поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$ 
  - сцеплен только с  $w_1$
  - наводит ЭДС только в  $w_1$
  - замыкается по воздуху
- поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$ 
  - сцеплен только с  $w_2$
  - наводит ЭДС только в  $w_2$
  - замыкается по воздуху



# Работа трансформатора под нагрузкой

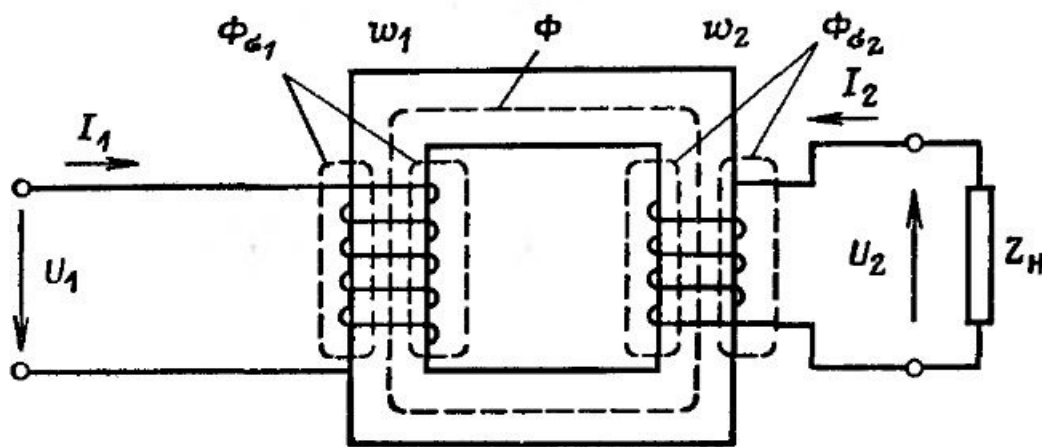
Поток взаимоиндукции  $\Phi$  создается совместно  $F_1$  и  $F_2$   
Если принять токи  $\dot{i}$ , можно использовать комплексы

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = (\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2) = \dot{F}_{12} \text{ – результирующая МДС}$$

МДС  $F_{12}$ , создающая поток  $\Phi$ , – МДС намагничивания

По аналогии с ХХ запишем  $F_{12} = I_{12} w_1$

$I_{12}$  – намагничивающий ток (в первичной обмотке)



Преобразуем баланс МДС:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_{12} w_1$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_{12}$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{12}$$

При ХХ  $I_2 = 0$  и  $\dot{I}_1 = \dot{I}_{12}$   
(ток ХХ  $I_0$  = намагничивающий ток  $I_{12}$ )

При увеличении нагрузки ток  $I_{12}$  немного меняется, но вплоть до номинальной нагрузки можно считать, что  $\dot{I}_{12} \approx \dot{I}_0$

# Работа трансформатора под нагрузкой

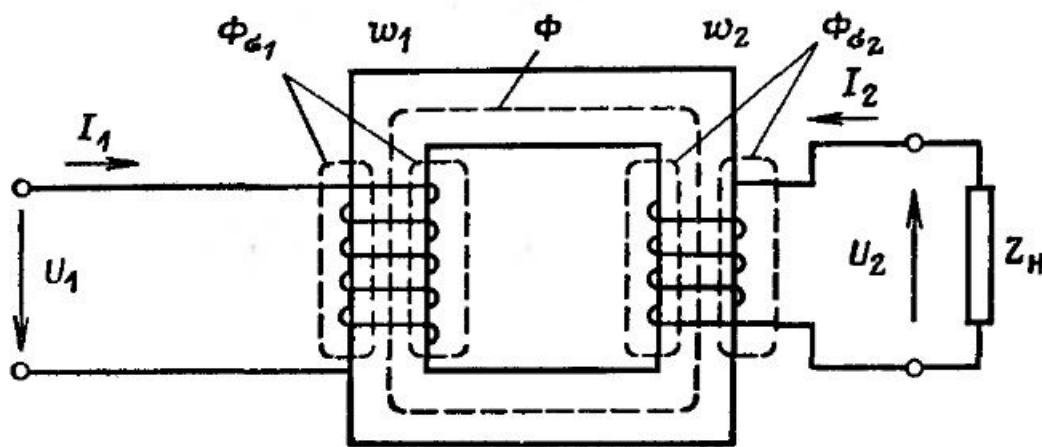
Процесс намагничивания током  $I_{12}$  аналогичен ХХ

→ ток  $I_{12}$  также имеет две составляющие:

- реактивная (совпадает по фазе с  $\Phi$ ) → создает  $\Phi$
- активная (опережает  $\Phi$  на  $\pi/2$ ) → потери в стали

При насыщении сердечника  $\Phi = f(I_{12})$  – нелинейно

→ ток  $I_{12}$  не  $\sin$  → будем использовать эквивалентный  $\sin$  ток  $I_{12}$  с тем же действующим значением



Потоки рассеяния:

- $\Phi_{\sigma 1}$  создан МДС  $I_1 w_1$ , сцеплен с  $w_1$
  - $\Phi_{\sigma 2}$  создан МДС  $I_2 w_2$ , сцеплен с  $w_2$
- не участвуют в передаче энергии

$\Phi_{\sigma 1}$ ,  $\Phi_{\sigma 2}$  замыкаются по воздуху

- в воздухе/масле  $\mu = 1\mu_0$
- магнитное сопротивление велико  
→ потоки рассеяния малы
- т.к.  $\mu_0 = \text{Const}$ ,  $\Phi_{\sigma 1} \sim I_1$ ,  $\Phi_{\sigma 2} \sim I_2$   
(линейно, нет насыщения)

Потоки  $\Phi$ ,  $\Phi_{\sigma 1}$ ,  $\Phi_{\sigma 2}$

можно рассматривать независимо,  
а результат их действия суммировать  
(принцип суперпозиции)

# Работа трансформатора под нагрузкой

Каждый поток переменный  $\rightarrow$  создает свою ЭДС

$$\Phi \rightarrow E_1 \text{ и } E_2, \Phi_{\sigma 1} \rightarrow E_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2} \rightarrow E_{\sigma 2}$$

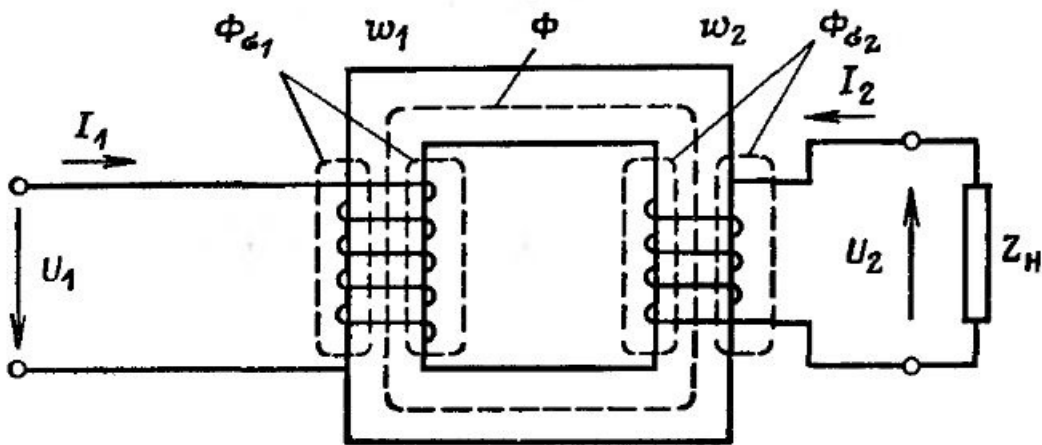
По II закону Кирхгофа для обмоток

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1;$$

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_H. \quad (\dot{I}_2 Z_H = \dot{U}_2)$$

Поскольку потоки рассеяния  $\sim$  токам обмоток,

то и ЭДС  $E_{\sigma 1} = x_1 I_1, \quad E_{\sigma 2} = x_2 I_2.$



Поскольку  $E$  отстает от  $\Phi$  на  $\pi/2$ ,  
а фаза  $\Phi$  совпадает с  $I$

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jx_1 \dot{I}_1, \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -jx_2 \dot{I}_2.$$

Тогда, уравнения электрического равновесия

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + jx_1 \dot{I}_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - jx_2 \dot{I}_2.$$

или

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2.$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{12}$$

Основные  
уравнения  
трансформатора

( $U_1$  – внешняя ЭДС источника,  $-E_1$  – противоЭДС ;  
 $E_2$  – ЭДС вторичной цепи,  $U_2 = I_2 Z_H$ )

$x_1, x_2$  – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток ( $x = \omega L, L = \Psi / I$ )

# Работа трансформатора под нагрузкой

При нагрузках вплоть до номинальной падение напряжения  $I_1 Z_1$  всего 2...4% от  $U_1$   
Можно считать  $U_1 \approx E_1$

Поскольку  $E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m$

то при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$ ,  $\Phi_m = \text{const}$

Тогда намагничивающий ток  $I_{12} = \text{const}$

→ при росте нагрузки (тока  $I_2$ ) должен расти ток  $I_1$  на величину  $-I'_2$

$$(I_1 + I'_2 = I_{12})$$

– передача энергии в нагрузку

Т.к.  $I_{12} \approx I_0$  относительно мал, то при номинальной нагрузке

$$I_1 \approx I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} \quad \text{откуда} \quad \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}$$

Если при работе от сети с  $U_1 = \text{const}$  изменится частота  $f_1$  или число витков  $w_1$ , то должен измениться поток  $\Phi_m$ , т.к.

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m$$

Если снизится частота  $f_1$ , то поток  $\Phi_m$  возрастет

Если уменьшить  $w_1$ , то поток  $\Phi_m$  возрастет

Пример – включение тр-ра на частоту  $f_1 = 60$  Гц  
 $f_1' = 1,2f_1 \rightarrow \Phi'_m = 0,8333 \Phi_m$  (и индукция  $B$ )

Удельные потери в стали (Вт/кг) известны

Как изменятся потери в стали?

$$P_{\text{ст}} = P_{1,0/50} B^2 \left( \frac{f}{50} \right)^{(1.3...1.6)}$$

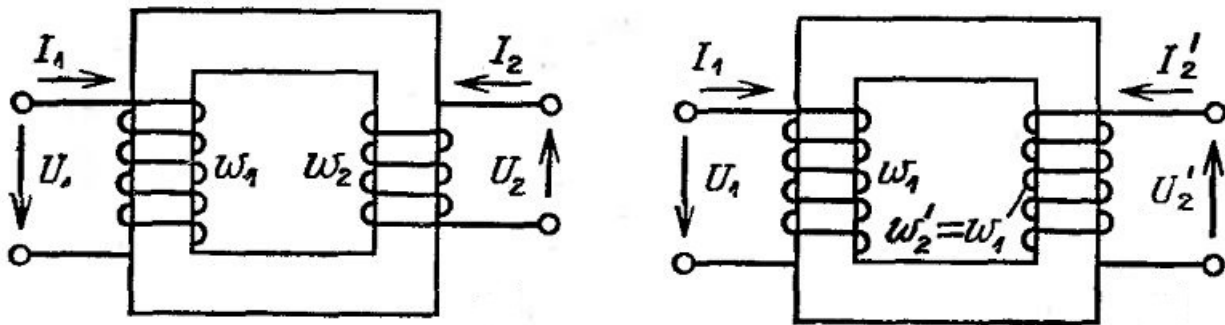
# Приведение величин вторичной обмотки к $w_1$

- При больших  $k_T$  величины первичной и вторичной обмоток сильно различаются → удобно использовать приведенные величины;
- В случае использования приведенных величин → возможно создать единую схему замещения тр-ра

Приведенный тр-р – одинаковые числа витков

$$w'_2 = w_1$$

Замена эквивалентна, если энергетические и электромагнитные соотношения не изменятся



ЭДС вторичной обмотки

$$E'_2 = E_1 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_2 k_T$$

$$E'_2 = E_2 k_T$$

Аналогично  $U'_2 = U_2 k_T$

МДС вторичной обмотки должна сохраниться

$$F'_2 = F_2 \rightarrow I'_2 w_1 = I_2 w_2 \rightarrow I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = I_2 \frac{1}{k_T}$$

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{k_T}$$

Полная мощность вторичной обмотки

$$U'_2 I'_2 = U_2 k_T I_2 \frac{1}{k_T} = U_2 I_2$$

# Приведение величин вторичной обмотки к $w_1$

Электрические потери во вторичной обмотке должны сохраниться

$$(I'_2)^2 r'_2 = I_2^2 r_2 \quad \text{тогда} \quad r'_2 = r_2 \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2 = r_2 k_T^2$$

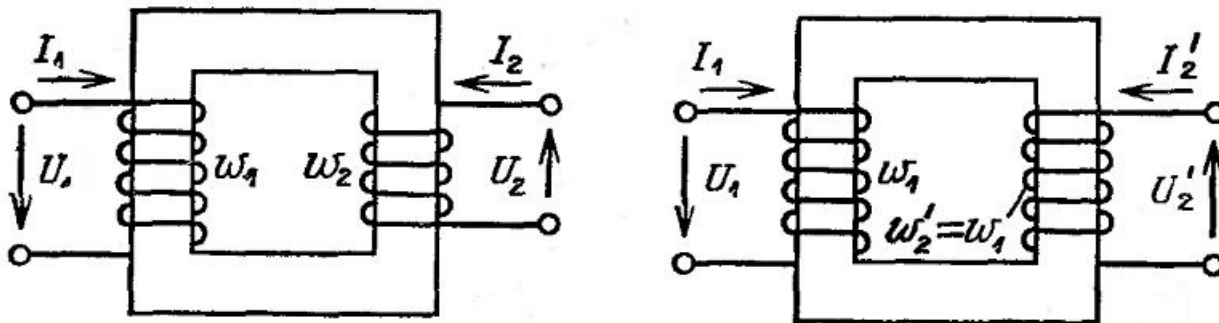
Соотношение  $r$  и  $x$  должно сохраниться

$$\text{тогда} \quad x'_2 = x_2 k_T^2 \quad \text{и} \quad Z'_2 = Z_2 k_T^2$$

$$\text{аналогично} \quad Z'_H = Z_H k_T^2$$

Уравнения приведенного тр-ра

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 - j \dot{I}'_2 x'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_{12} \end{aligned}$$



# Векторная диаграмма трансформатора

Графическая иллюстрация уравнений тр-ра  
(R-L и R-C нагрузка)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$$

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

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{12}$$

- Поток  $\Phi$
- намагничивающий ток  $I_{12}$  (угол  $\alpha$ )
- ЭДС  $E_1$  и  $E_2$
- ток  $I'_2$  отстает / опережает
- напряжение  $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2$
- угол  $\varphi_2$
- ток  $\dot{I}_1 = \dot{I}_{12} - \dot{I}'_2$
- напряжение  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$
- угол  $\varphi_1$

