

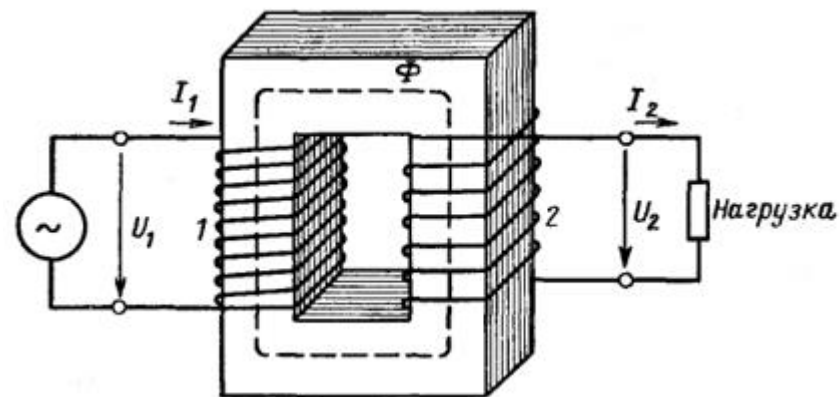
ТРАНСФОРМАТОРЫ

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
- обмотка ВН
- обмотка НН
- [обмотка СН]
- 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:

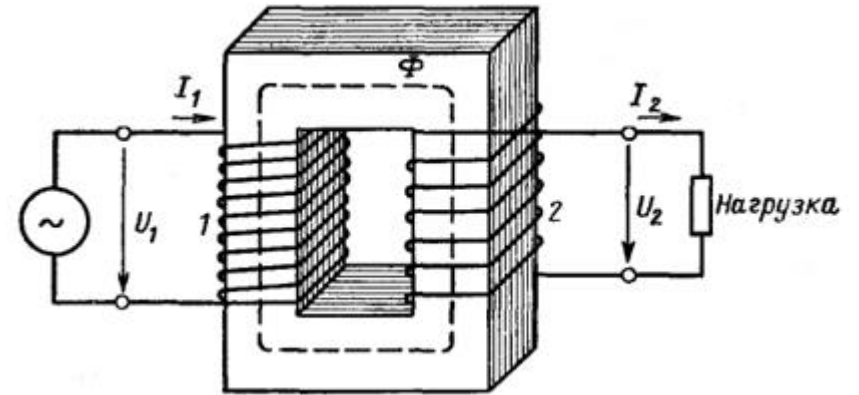
- потребители (нагрузка) $E_2 \rightarrow I_2; U_2 = I_2 Z_H$

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!

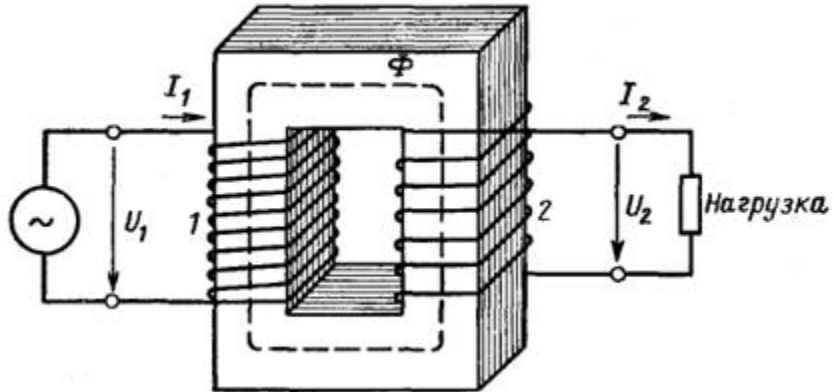
$E_2 = 0, I_2 = 0$ (нет передачи энергии)



Конструкция трансформатора

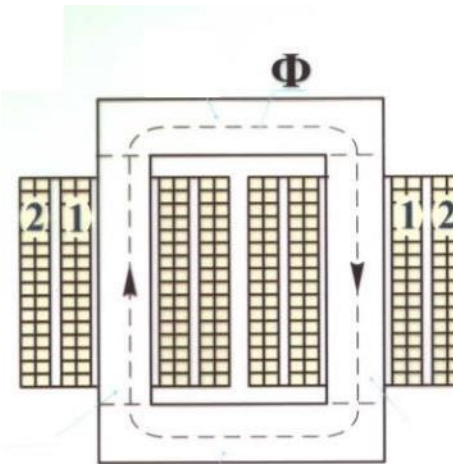
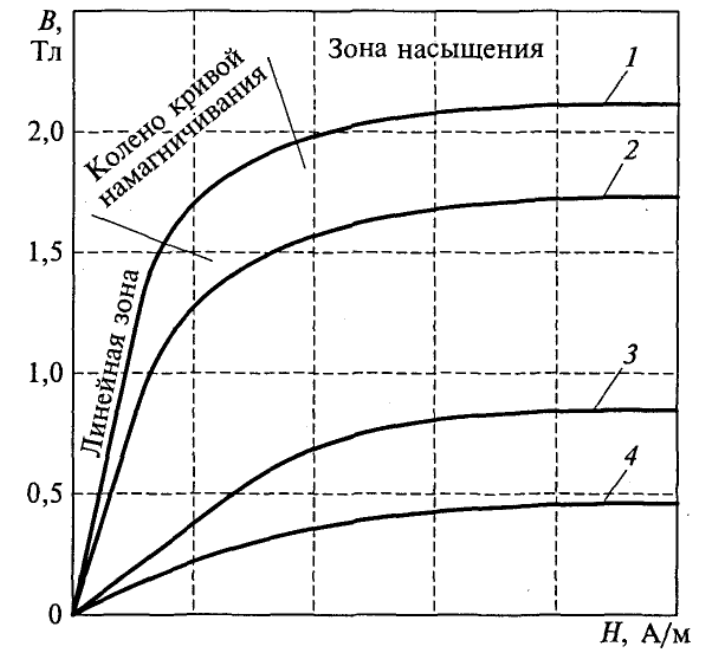
Магнитопровод

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

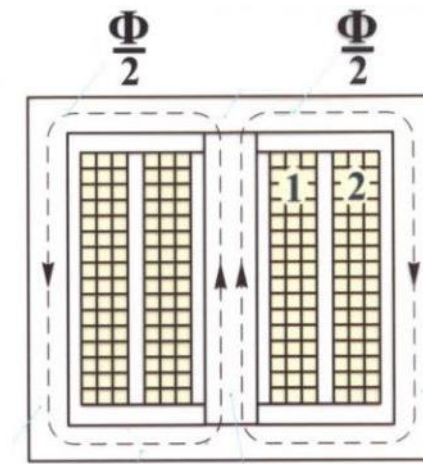


- стержень
- ярмо

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



стержневой
магнитопровод

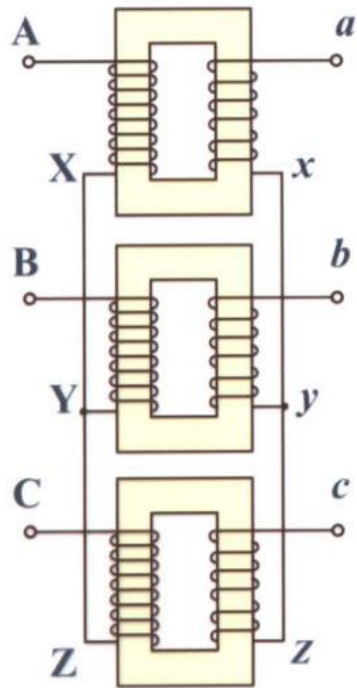


броневой
магнитопровод

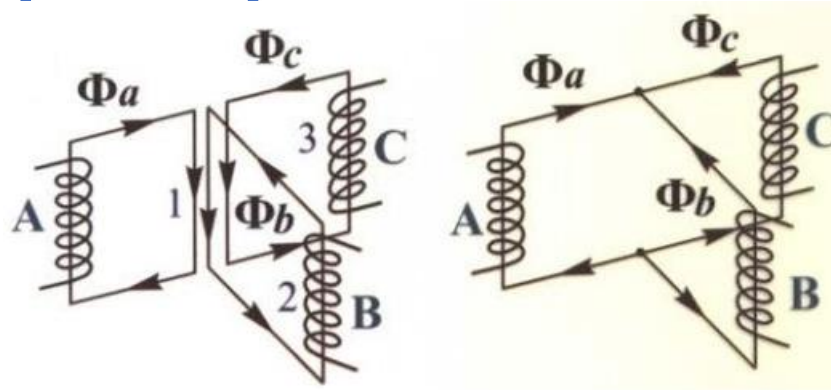
Конструкция трансформатора

Магнитопровод

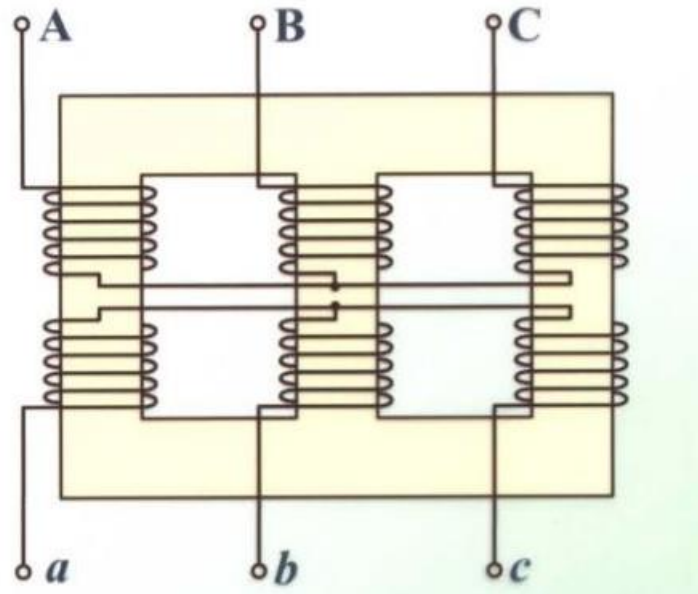
- Трехфазный трансформатор



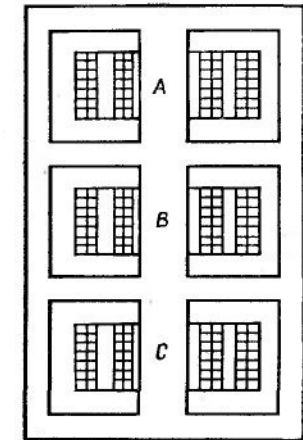
3-фазная группа
(групповой тр-р)



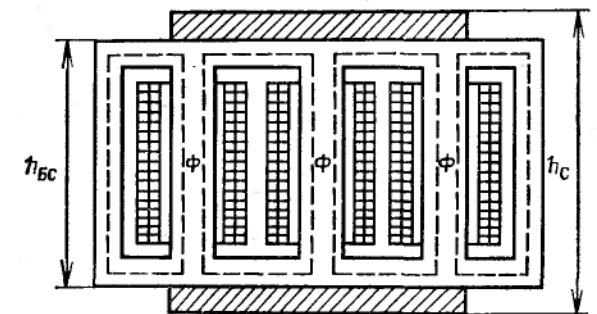
На стержне —
обе обмотки
одной фазы



3-фазный стержневой тр-р



3-фазный броневой тр-р

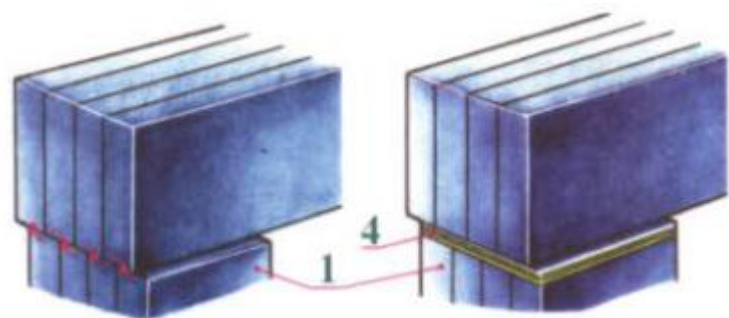


бронь-стержневой тр-р

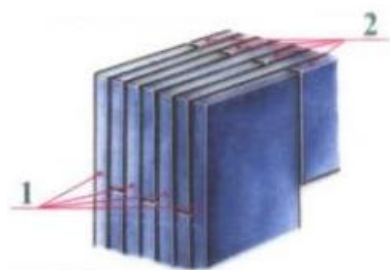
Конструкция трансформатора

Магнитопровод

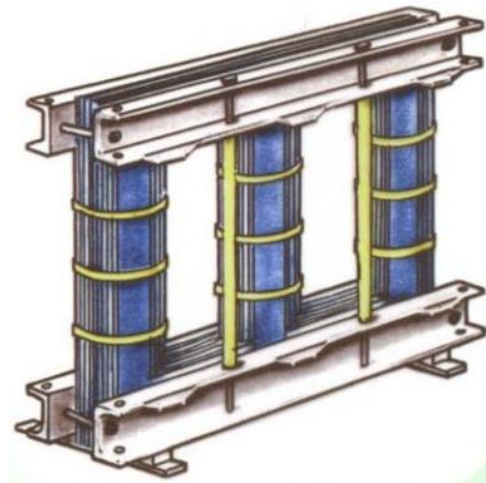
- шихтованный сердечник



Стыковое соединение

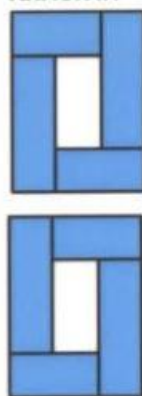


Сборка впереplet

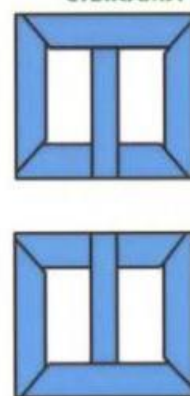


Остов трансформатора

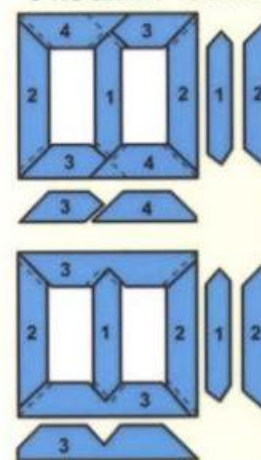
С ПРЯМЫМИ СТЫКАМИ ПЛАСТИН



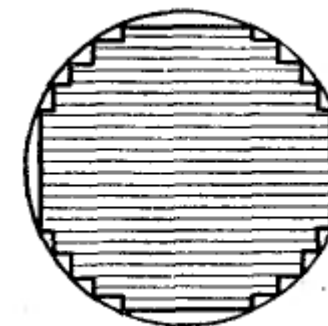
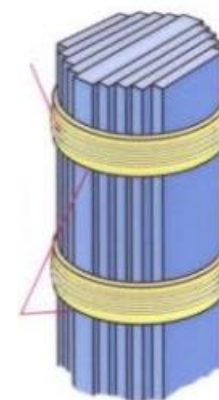
С КОМБИНИРОВАННЫМИ СТЫКАМИ



С КОСЫМИ СТЫКАМИ



Схемы шихтовки

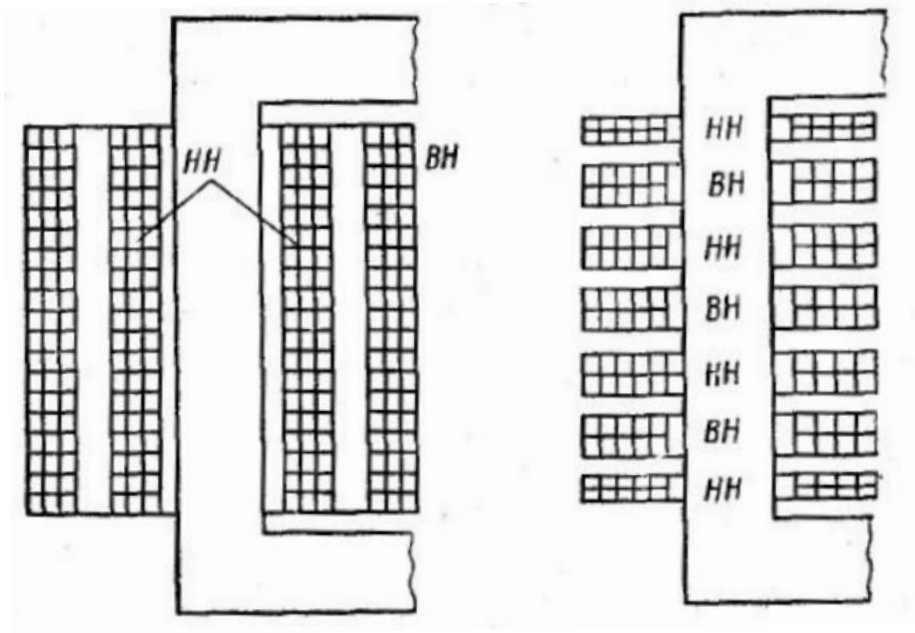


Сечение стержня / ярма

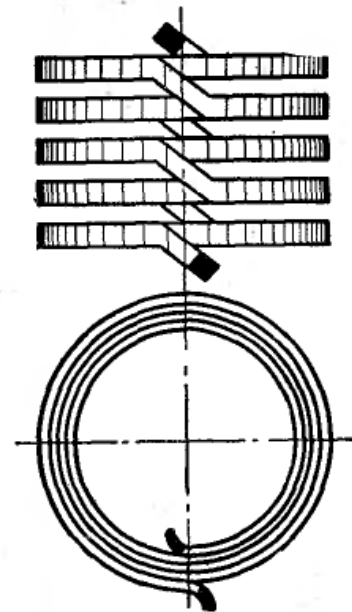
Конструкция трансформатора

Обмотки

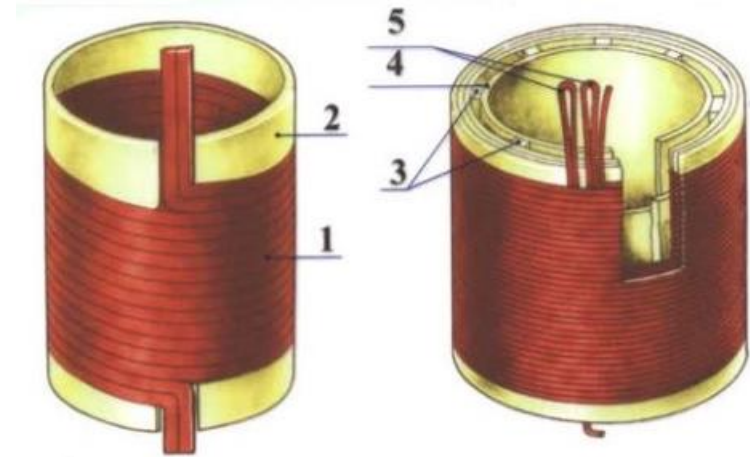
- медь / алюминий



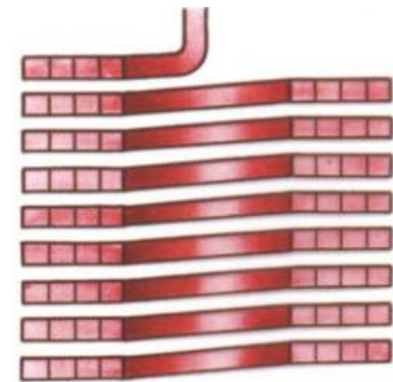
концентрические / чередующиеся
обмотки



спиральная катушечная
обмотка



цилиндрическая обмотка



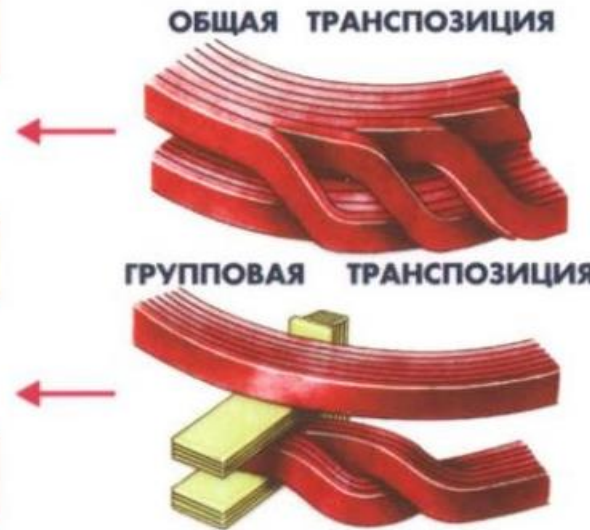
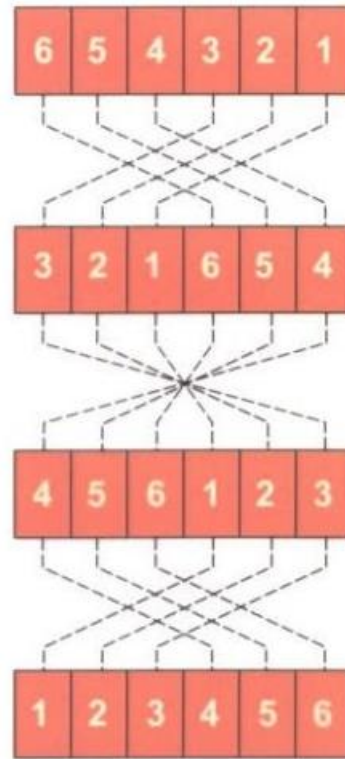
винтовая обмотка

Конструкция трансформатора

Обмотки



винтовая обмотка



Транспозиция
выравнивание r и x параллельных ветвей
→ равномерное распределение тока

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

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

Конструкция трансформатора

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

- **Главная**
(изоляции 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

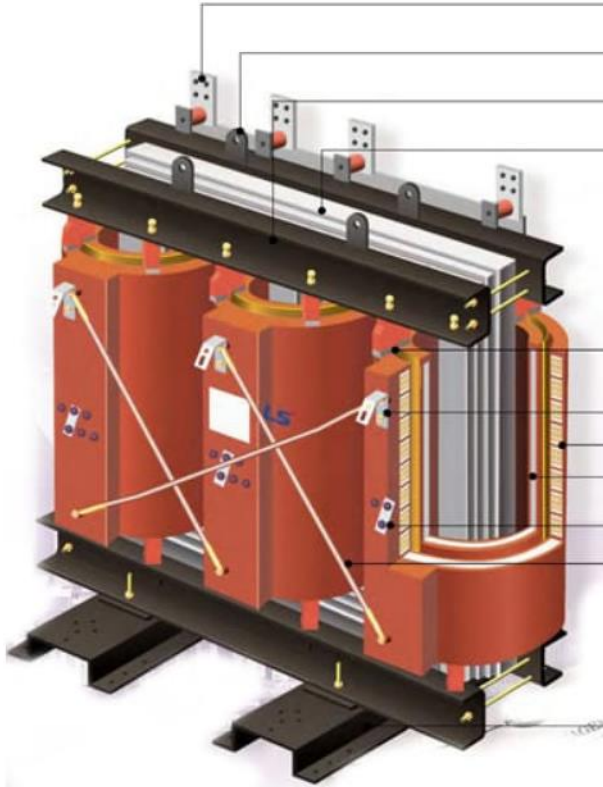
	<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
Мах допустимая температура, °C	90	105	120	130	155	180	>180

Трансформаторное масло, дерево, картон – класс ***A***

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

Конструкция трансформатора

Конструктивные части



Сухой трансформатор



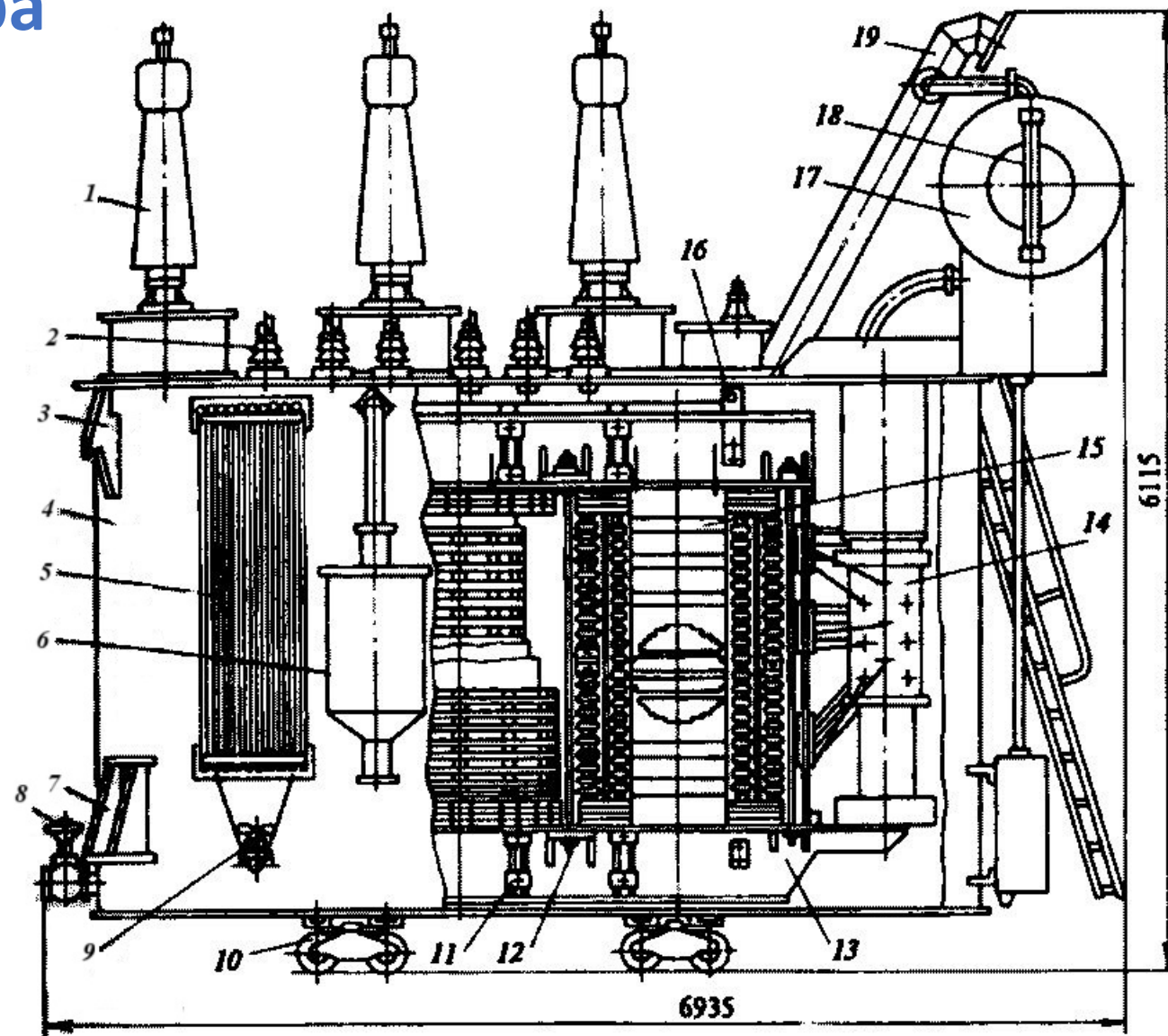
Масляный трансформатор

- Трансформаторное масло
- диэлектрик
 - хладагент

Конструкция трансформатора

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

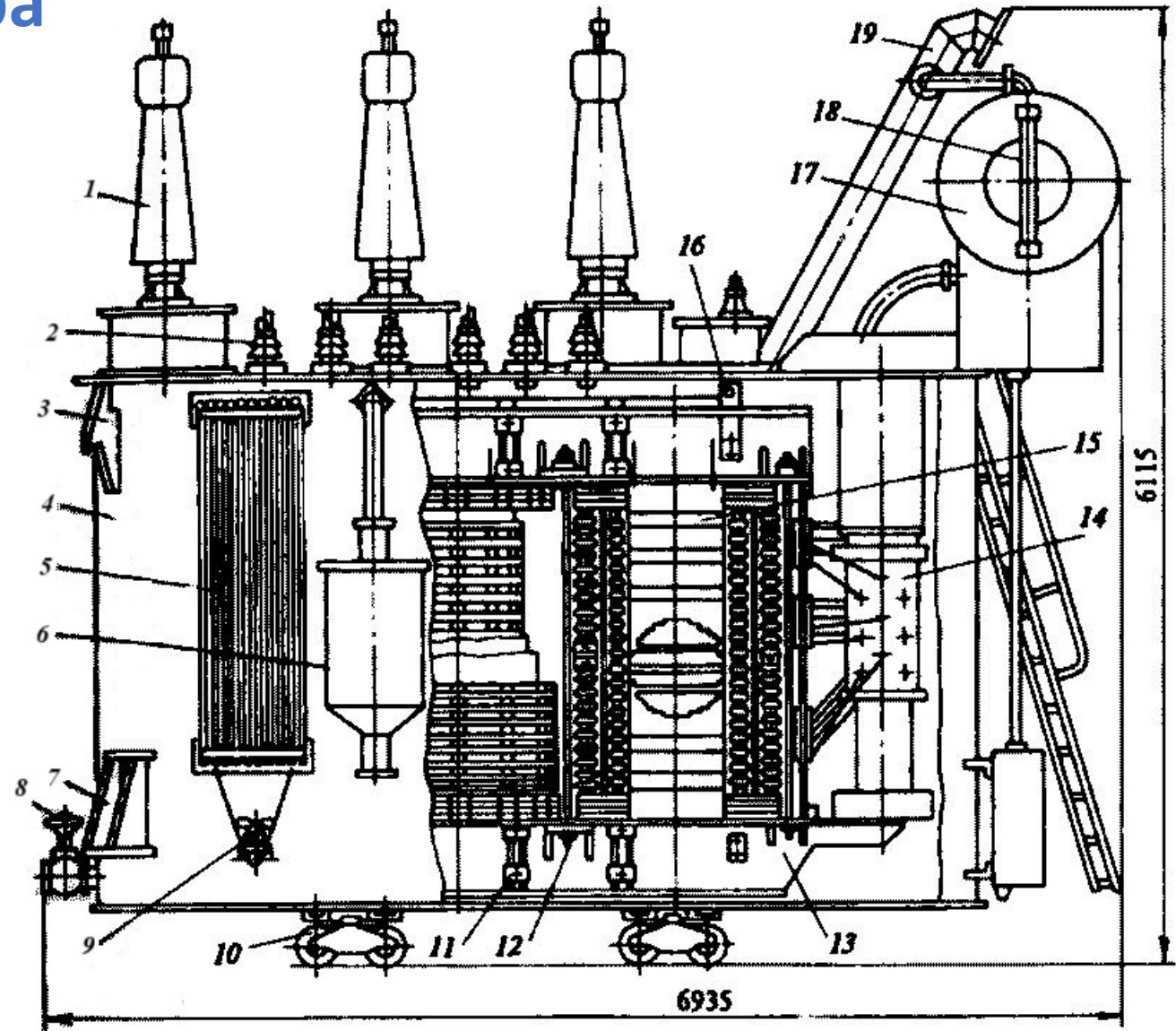
- 1 – ввод ВН 110 кВ
- 2 – ввод НН 10 кВ
- 3 – крюк для подъема трансформатора
- 4 – бак
- 5 – радиатор
- 6 – фильтр термосифонный
- 7 – скоба для подъема домкратом
- 8 – вертикальный кран для слива масла
- 9 – вентилятор
- 10 – каток
- 11 – полубандажи стяжки ярма
- 12 – вертикальная стяжная шпилька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



Конструкция трансформатора

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

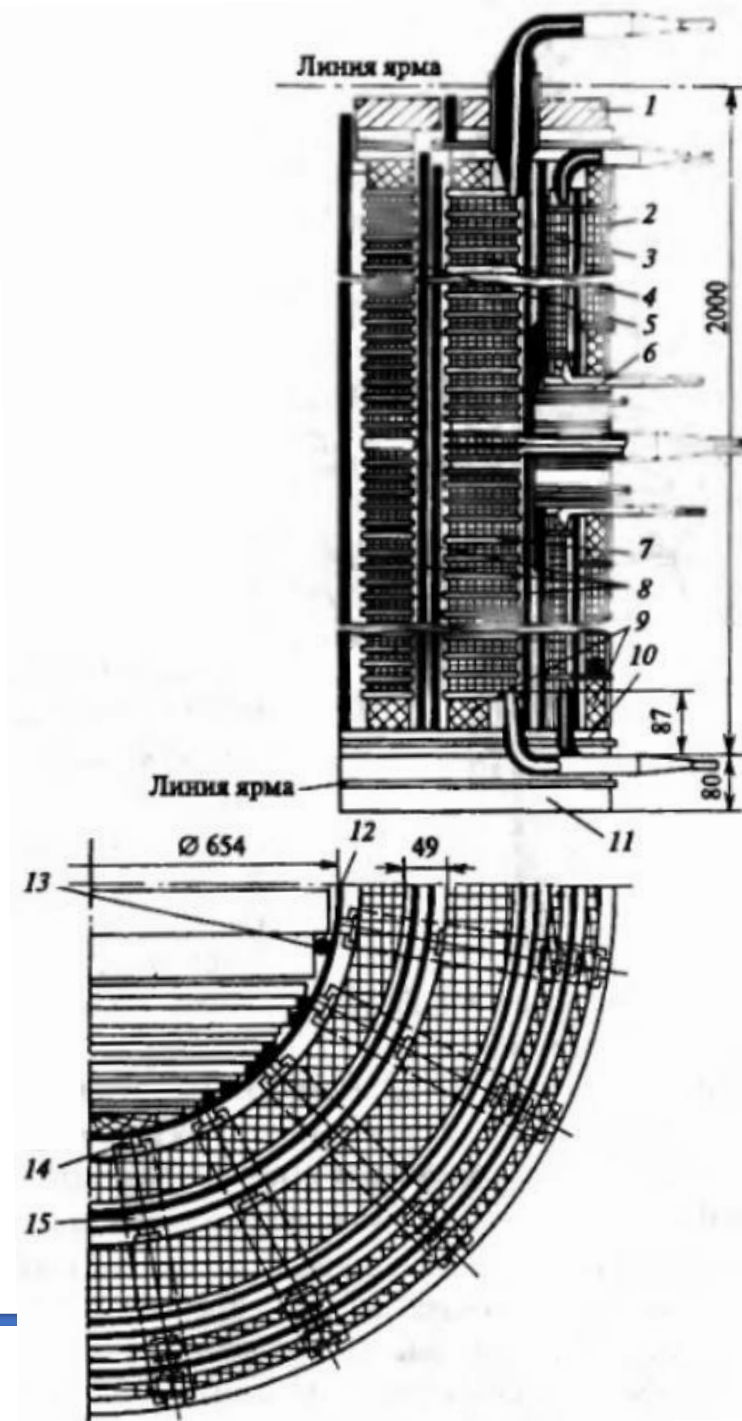
- 14 – устройство переключения ответвлений
обмотки ВН
- 15 – бандажки стяжки стержня
- 16 – пластина с проушиной для подъема
активной части
- 17 – расширитель
- 18 – маслоуказатель
- 19 – предохранительная труба



Конструкция трансформатора

Обмотки трансформатора

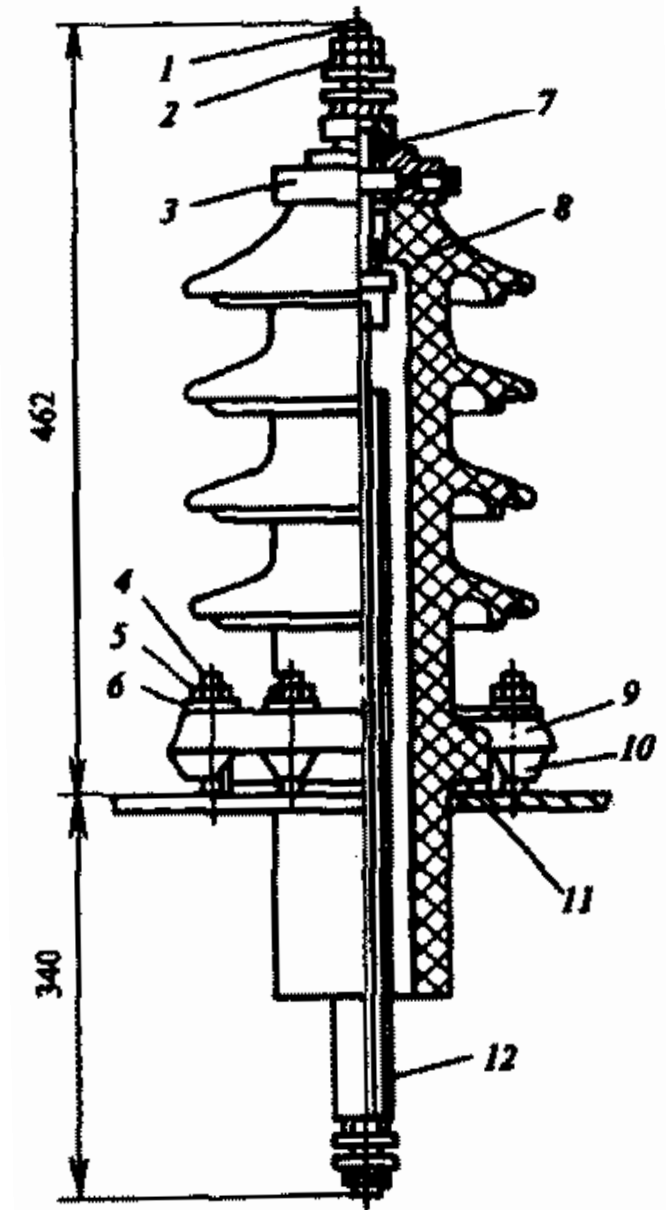
- 1 – стальное прессующее кольцо
- 2 – обмотка тонкого регулирования
- 3 – обмотка грубого регулирования
- 4 – обмотка ВН
- 5 – обмотка НН
- 6 – угловая изоляционная шайба
- 7 – межкатушечные прокладки
- 8 – изоляционные цилиндры
- 9 – опорные кольца из электроизоляционного картона
- 10 – ярмовая изоляция 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)**

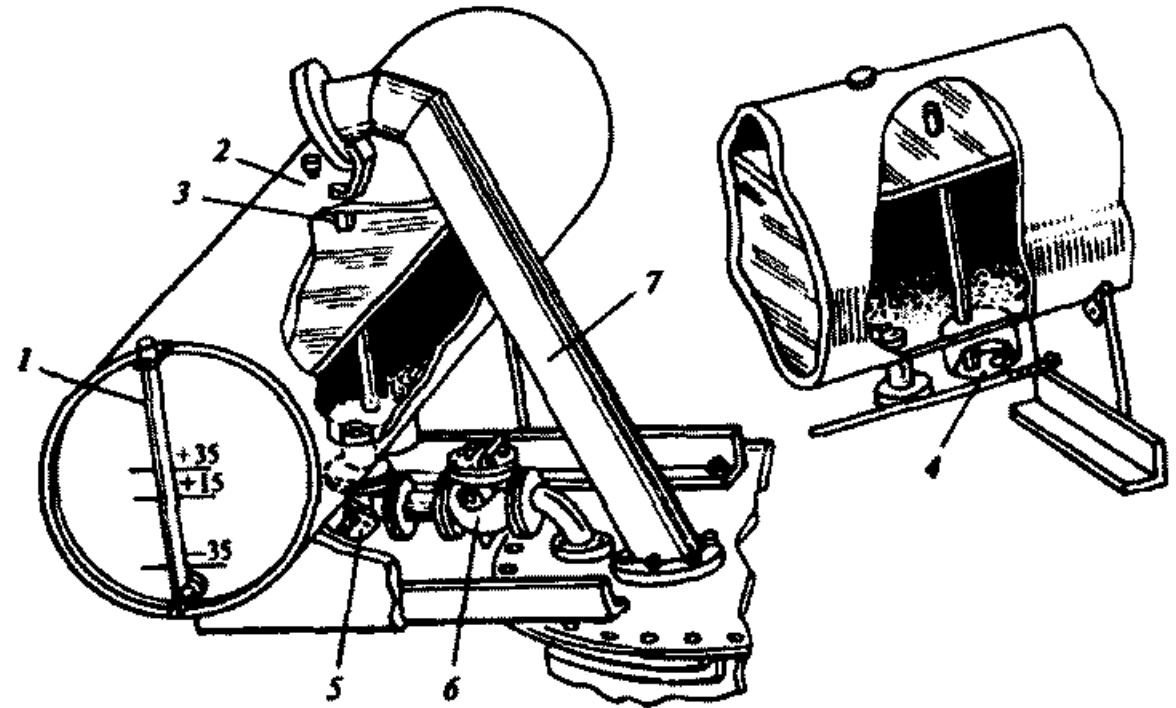
- 1 – медная шпилька
- 2 – латунная гайка
- 3 – латунный колпак
- 4,5,6 – стальные шпилька, гайка, шайба
- 7 – резиновое кольцо
- 8 – фарфоровый изолятор
- 9 – стальной штампованный фланец
- 10 – кулачок
- 11 – резиновое уплотнение
- 12 – токоведущая шпилька с изолирующей трубкой



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

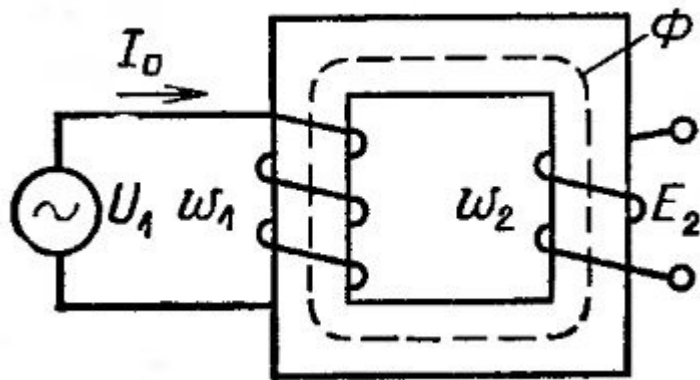
ТРАНСФОРМАТОРЫ

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 Φ)

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

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

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

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

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

ЭДС отстает от Φ
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

$$k_{\text{т}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

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

на практике определяют

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

Принято: U_1, E_1, w_1 – обмотка ВН

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

Для 3-фазного тр-ра:

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

Например, для схемы Δ/Y

$$k_{\text{тл}} = \frac{U_{\text{л1}}}{U_{\text{л2}}} = \frac{U_{\text{ф1}}}{\sqrt{3}U_{\text{ф2}}} = \frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}$$

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

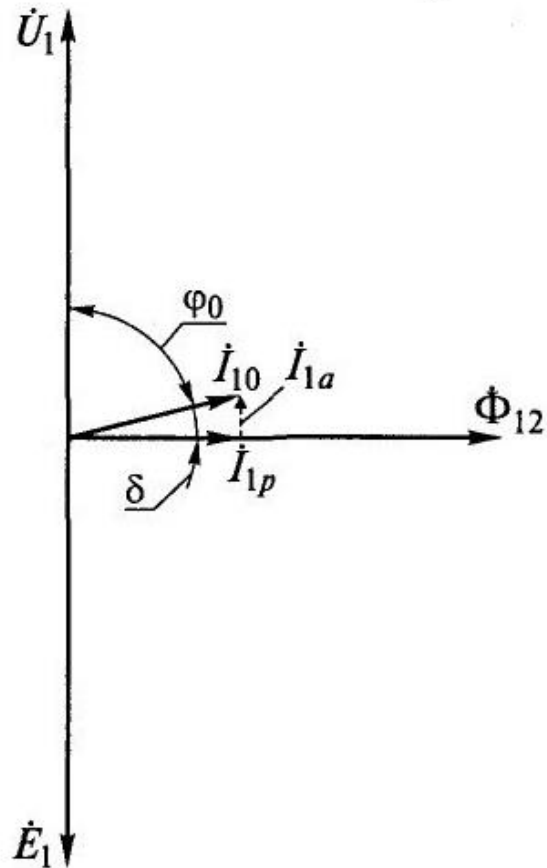
- потери на гистерезис (перемагничивание)
- потери на вихревые токи (в магнитопроводе)

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 Φ
- 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 μ
 - 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 $I_{1н}$)

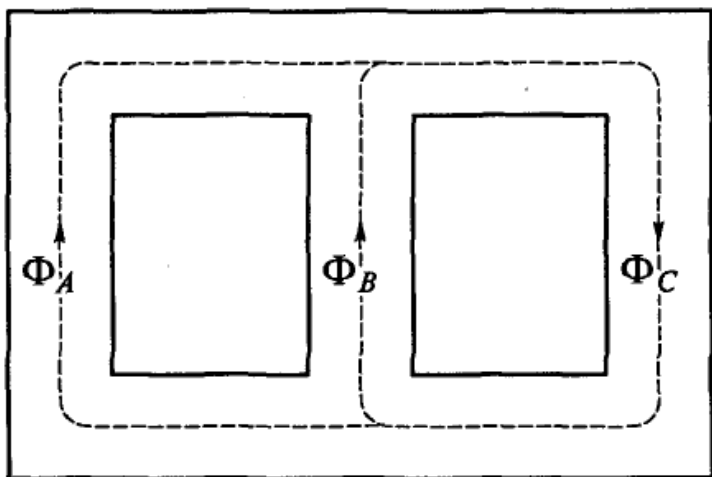
Холостой ход трансформатора

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 Φ_B меньше
→ намагничивающий ток фазы B меньше

Разница невелика

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

ТРАНСФОРМАТОРЫ

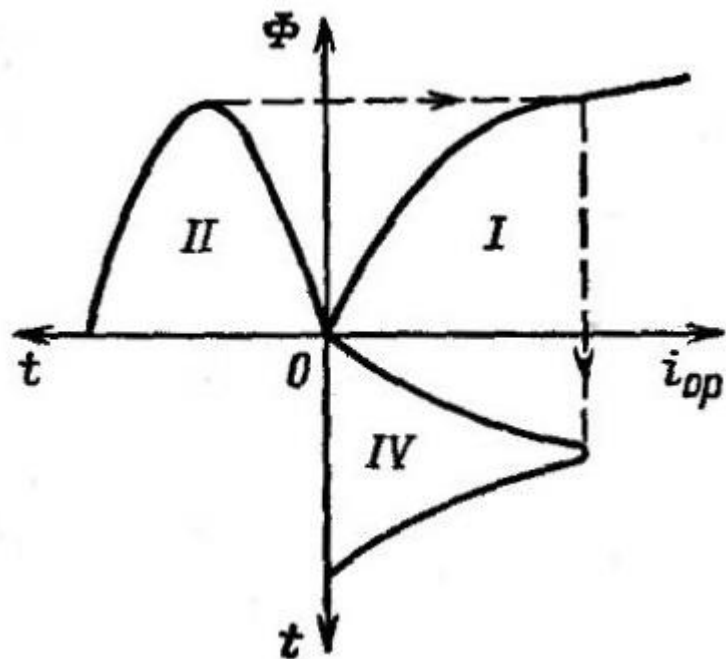
Явления при намагничивании
магнитопровода

Явления при намагничивании магнитопровода

Нелинейная кривая намагничивания $B(H)$

→ нарушение пропорциональности
между Φ и I_{op}

Связь между Φ и i_{op} → характеристика
намагничивания [сердечника]

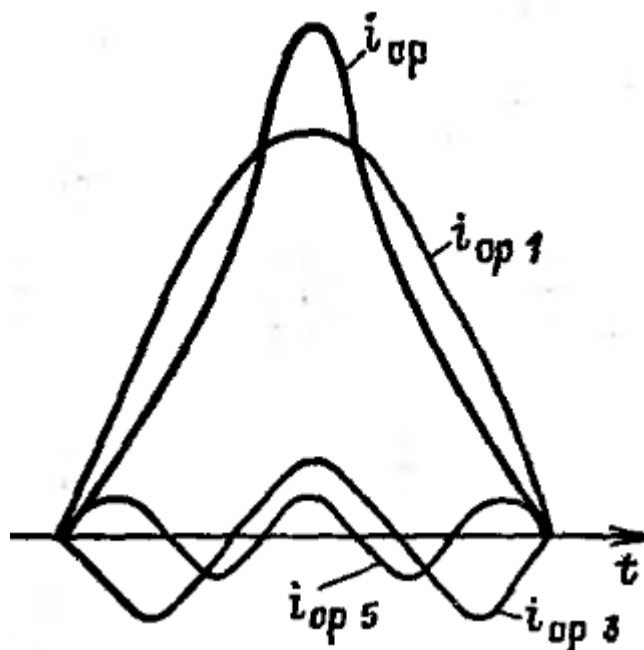


Однофазный трансформатор

Рассмотрим питание от \sin источника U_1

→ Φ также \sin

Для каждого мгнов.значения потока Φ по
характеристике намагничивания найдем
мгнов.значения тока i_{op} → несинусоидально!



При разложении в гарм.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

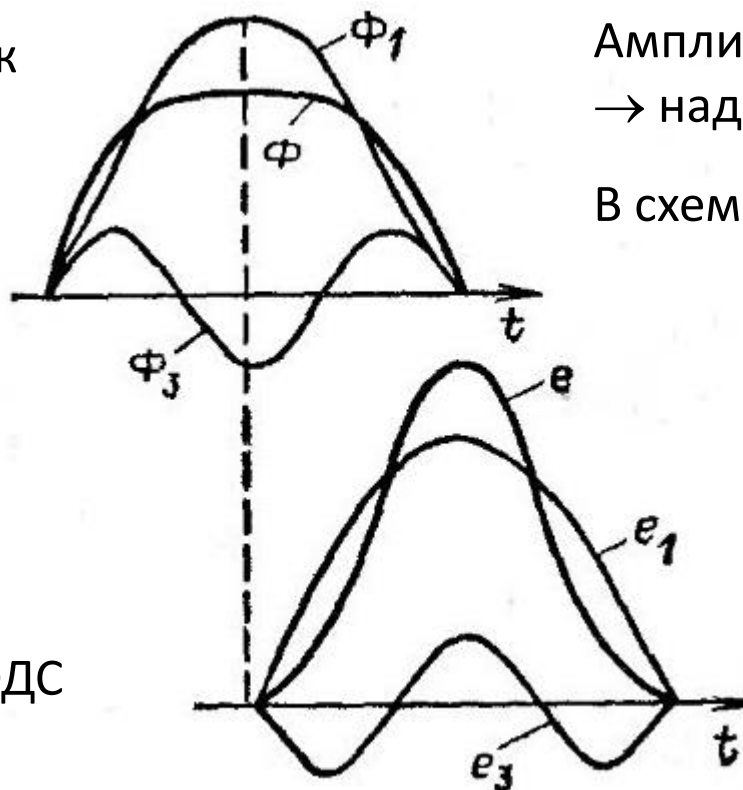
Трехфазный трансформатор

Случай 1. Схема соединения Y/Y

3-фазная система \sin напряжений –
фазовый сдвиг осн. гармоник 120°

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

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



ЭДС от Φ_v пропорциональна Φ_{mv} и $f_v = v f_1$

Величина 3 гармоники 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 гармоники синфазны →
в линейных ЭДС нет 3 гармоники
($\sin E_{1л}$ 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 $\sum \Phi_3 \neq 0$)

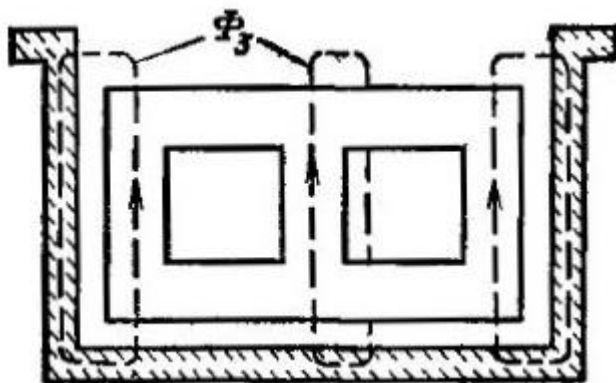
→ магнитное сопротивление

большое → Φ_3 маленький →

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

В стержневом тр-ре Φ_3 замыкаются по конструктивным элементам (бак)

→ нагрев → растут потери P_0



ГОСТ не предусматривает использование схемы Y/Y

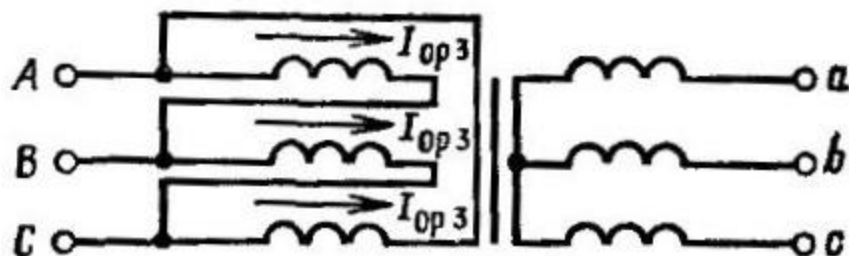
Явления при намагничивании магнитопровода

Трехфазный трансформатор

Случай 2. Схема соединения Δ/Y

Для Δ в первичной цепи $U_{1л} = U_{1ф}$
→ фазные $U \sin$ → потоки Φ тоже \sin
→ нечетные гармоники $I_{0ф}$
т.к. 3 гармоники совпадают по фазе,
они замыкаются по фазам в Δ
(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/Δ

При схеме Y ток $I_{0р} \sin$ → гармоники Φ
→ гармоники E_1 и E_2
3 гармоника E_2 складывается в фазах Δ
→ там циркулируют токи $I_{2(3)}$



Ток $I_{2(3)}$ с частотой $3f_1$ отстает от $E_{2(3)}$
→ создает поток, компенсирующий Φ_3
→ полный поток Φ_3 мал, малы и E_3

Рекомендуется одну из обмоток
включать по схеме Δ

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 Φ и ЭДС нет 3 гармоника

Но в нулевом проводе – Σ 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)

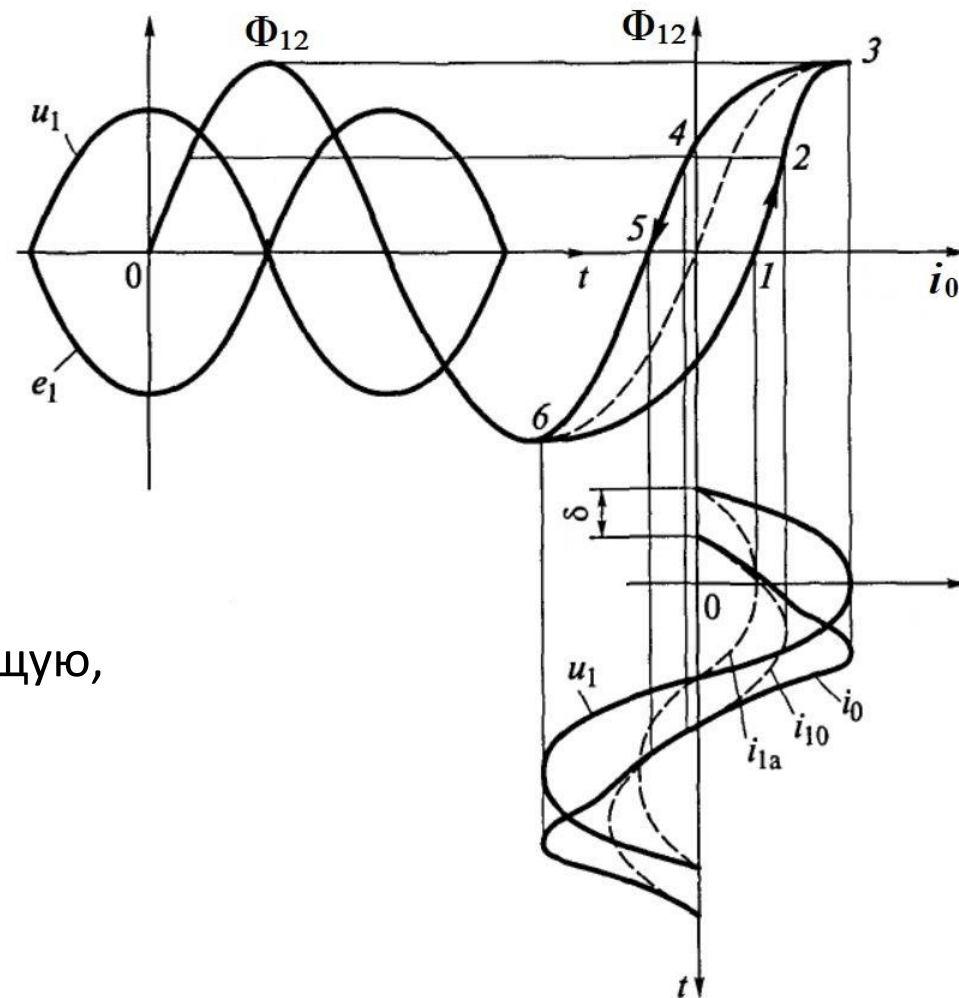
Явления при намагничивании магнитопровода

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 Φ_{12} на 90° , $\Phi_{12} = 0$ 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)

$$\begin{aligned} i_{10} &= I_{1m} \sin(\delta + \omega t) = I_{1m} \sin \delta \cos \omega t + I_{1m} \cos \delta \sin \omega t \\ &= I_{1ma} \cos \omega t + I_{1mp} \sin \omega t = i_{1a} + i_{1p} \end{aligned}$$



Явления при намагничивании магнитопровода

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

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

Потери на гистерезис пропорциональны ширине петли гистерезиса

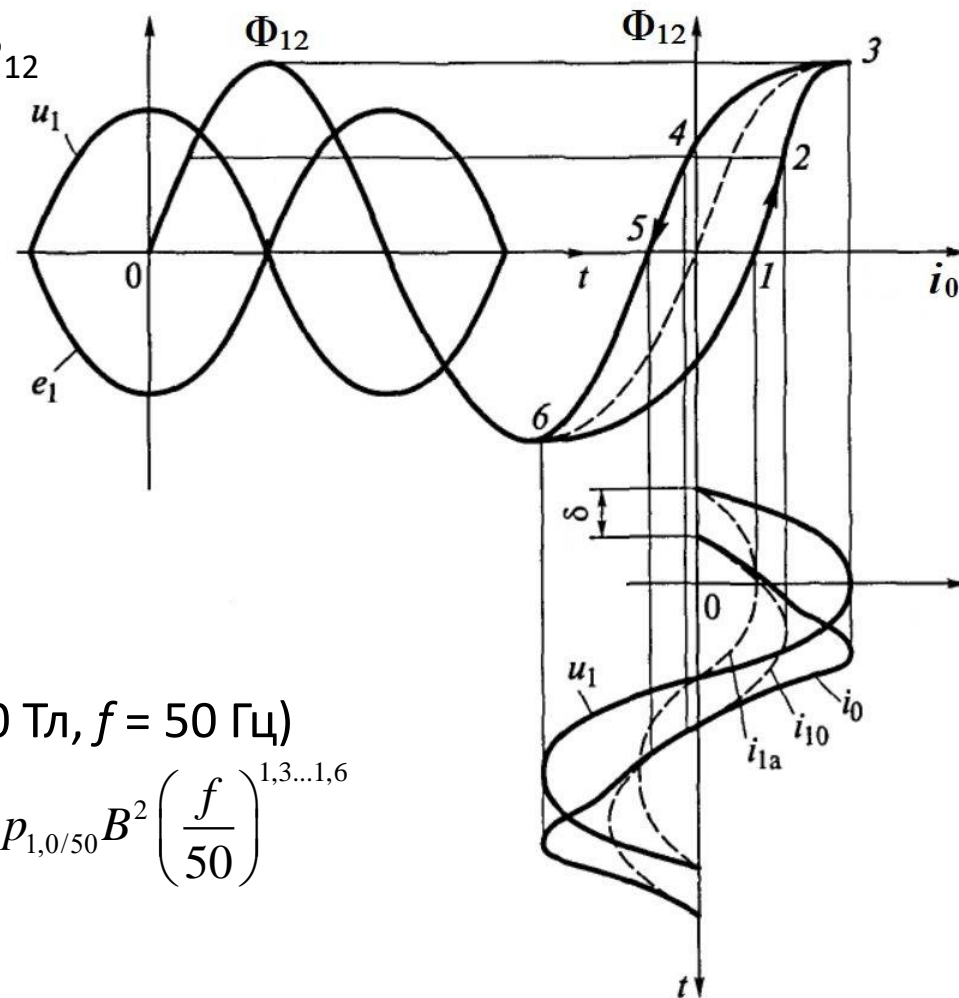
Также есть потери на вихревые токи, но они меньше при шихтовке сердечника

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 $p_{ст} = p_{1,0/50} B^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3 \dots 1,6}$

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



ТРАНСФОРМАТОРЫ

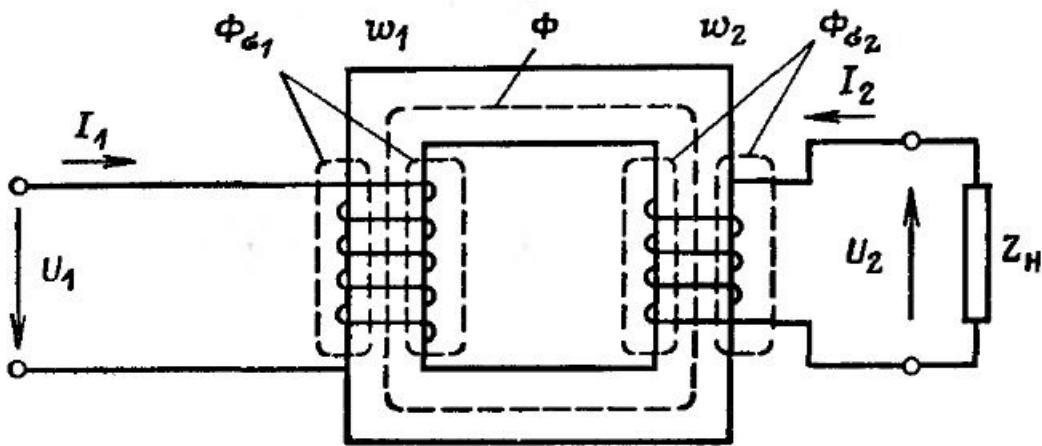
Работа трансформатора под
нагрузкой

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 Φ_1
 $I_2 \rightarrow$ МДС $F_2 \rightarrow$ магнитный поток Φ_2



Правило Ленца: ток I_2 создает поток Φ_2 , противодействующий исходному Φ_1

Но если результирующий Φ 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

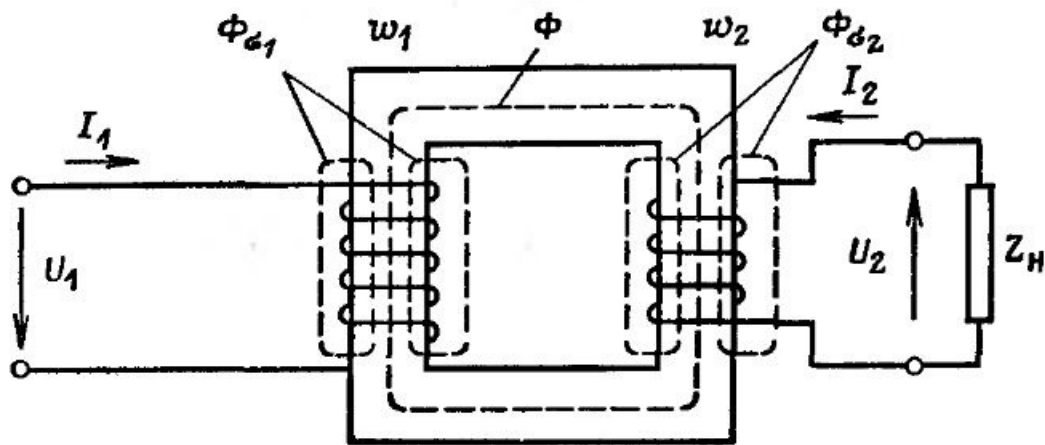
$\mu_{\text{ст}}$ превышает μ_0 в 10^3 раз \rightarrow 0,1% потока замыкается по воздуху

(уд.проводимость проводника превышает уд.проводимость диэлектрика в 10^{16} раз)

Результирующий
магнитный поток:

- поток взаимоиндукции Φ
 - 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 Φ создается совместно F_1 и F_2
Если принять токи **sin**, можно использовать комплексы

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

МДС F_{12} , создающая поток Φ , – МДС намагничивания

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

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

Преобразуем баланс МДС:

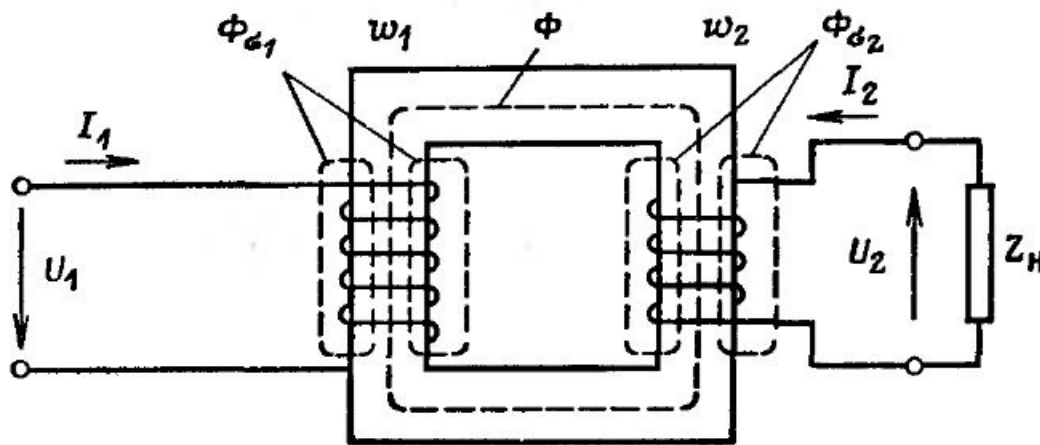
$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_{12} w_1$$

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

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

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

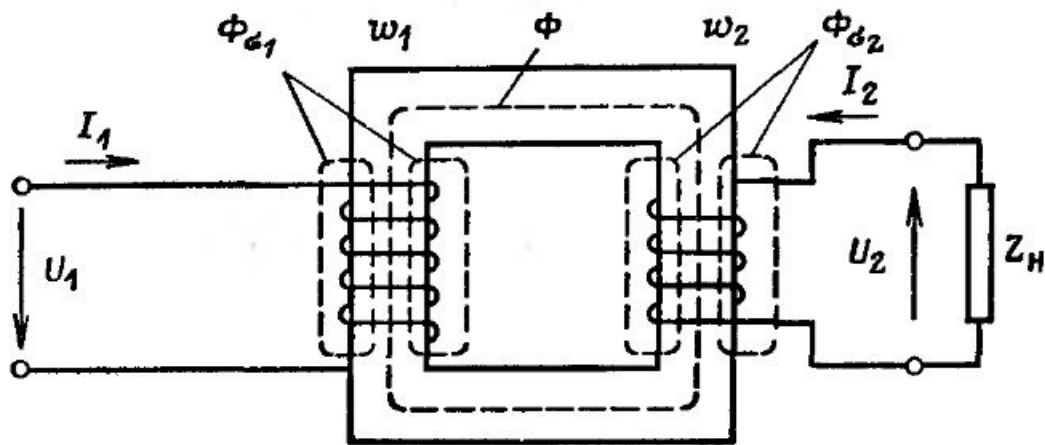
Процесс намагничивания током I_{12} аналогичен ХХ

→ ток I_{12} также имеет две составляющие:

- реактивная (совпадает по фазе с Φ) → создает Φ
- активная (опережает Φ 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 Φ , $\Phi_{\sigma 1}$, $\Phi_{\sigma 2}$

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

Работа трансформатора под нагрузкой

Каждый поток переменный \rightarrow создает свою ЭДС

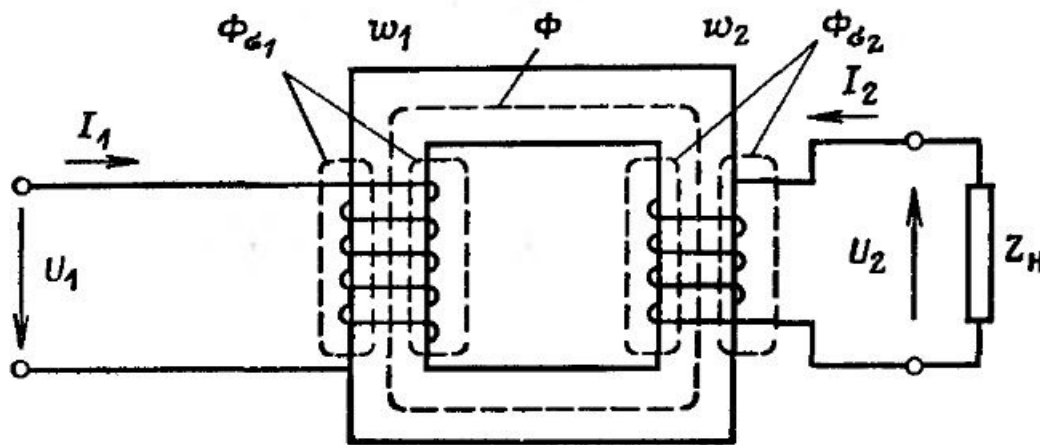
$$\Phi \rightarrow E_1 \text{ и } E_2, \Phi_{\sigma 1} \rightarrow E_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2} \rightarrow E_{\sigma 2}$$

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



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

Поскольку E отстает от Φ на $\pi/2$, а фаза Φ 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, $U_2 = I_2 Z_H$)

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 $-I'_2$

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

– 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 Φ_m , т.к.

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

Если снизится частота f_1 , то поток Φ_m возрастет

Если уменьшить w_1 , то поток Φ_m возрастет

Пример – включение тр-ра на частоту $f_1 = 60$ Гц
 $f'_1 = 1,2 f_1 \rightarrow \Phi'_m = 0,8333 \Phi_m$ (и индукция B)

Удельные потери в стали (Вт/кг) известны

Как изменятся потери в стали?

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

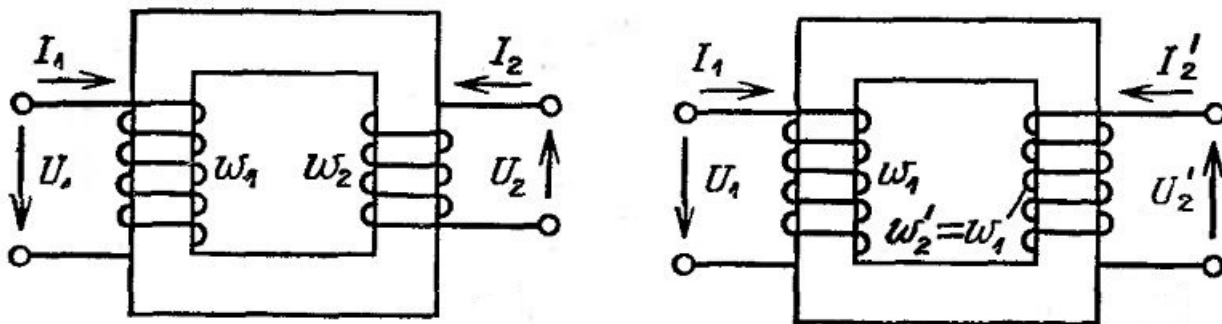
Приведение величин вторичной обмотки к w_1

- 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

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

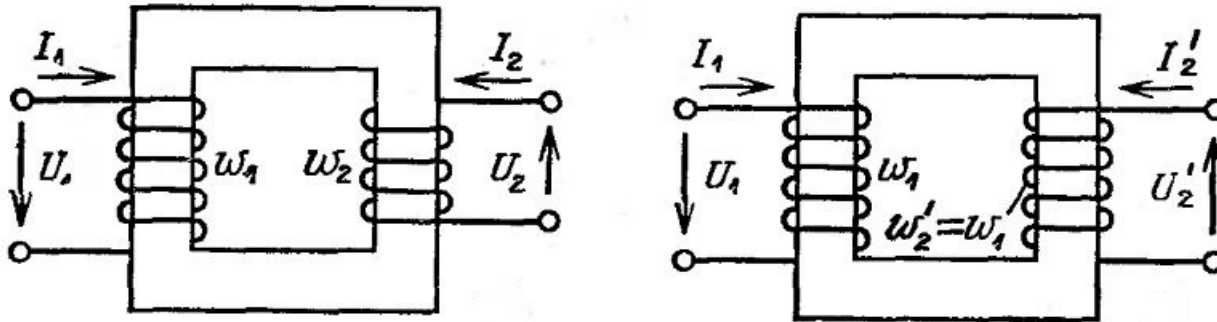
Соотношение r и x должно сохраниться

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

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

Уравнения приведенного тр-ра

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_{12}. \end{aligned}$$



Векторная диаграмма трансформатора

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

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

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2;$$

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

- Поток Φ
- намагничивающий ток I_{12} (угол α)
- 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 φ_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 φ_1

