

# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Несимметричная нагрузка  
трансформаторов

# Несимметричная нагрузка трансформаторов

Несимметричное распределение нагрузки по фазам

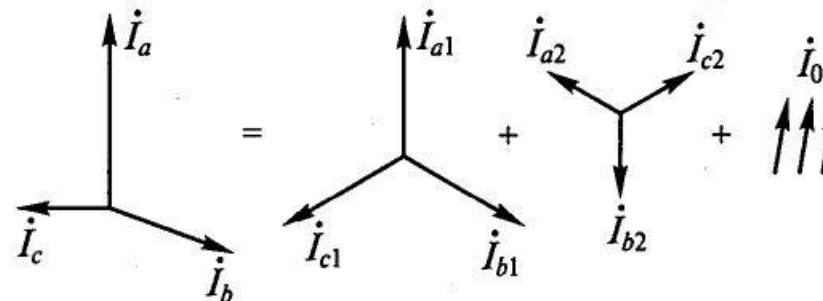
- разная нагрузка в фазах  $Z_{HA} \neq Z_{HB} \neq Z_{HC}$
- мощные однофазные потребители (печи)
- аварийные режимы (1-ф и 2-ф КЗ)

В результате

- токи фаз неодинаковы
  - фазовый сдвиг  $\neq 120^\circ$
  - магнитное поле несимметрично
  - невозможно найти х фаз
  - невозможен аналитический расчет
- несимметрия  $U_\phi$  и  $U_\lambda$
- доб. потери в тр-ре
  - снижение мощности 3-ф двигателей
  - ухудшение работы ламп (1-ф приборов)

1918 г. К.Л.Фортескью (Charles Legeyt Fortescue)

→ метод симметричных составляющих



Несимметричная Система =  
«прямая» + «обратная» + «нулевая»  
последовательности

$$\dot{I}_{a1} = (\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) / 3$$

$$\dot{I}_{a2} = (\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) / 3$$

$$\dot{I}_{a0} = (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) / 3$$

$$\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = \dot{I}_a$$

$$\dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0} = \dot{I}_b$$

$$\dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0} = \dot{I}_c$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

# Несимметричная нагрузка трансформаторов

Анализ симметричных составляющих,  
затем – метод суперпозиции

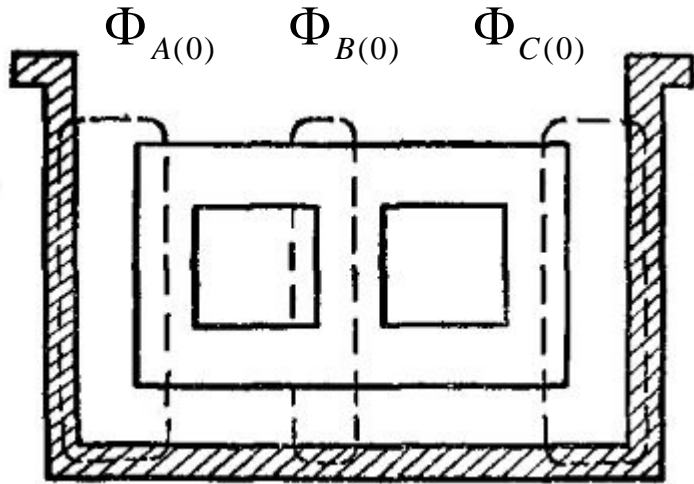
- Прямая и обратная последовательности влияют одинаково (симметричное поле, одинаковые параметры)
- Нулевая последовательность – параметры и переменные зависят от схемы соединения

## Схема Y/Y<sub>0</sub> (с нулевым проводом)

Во вторичной цепи  $I_2 = I_{2(1)} + I_{2(2)} + I_{2(0)}$

Токи  $I_{2(1)}$  и  $I_{2(2)}$  уравниваются  $I_{1(1)}$  и  $I_{1(2)}$   
(векторная разница равна намагнич.току  $I_{12}$ )

Ток  $I_{2(0)}$  ничем не компенсируется,  
так как  $I_{1(0)}$  в Y протекать не может  
→ ток  $I_{2(0)}$  – намагничивающий (создает  $\Phi_0$ )



Токи  $I_{2(0)}$  синфазны →  $\Phi_0$  не может замыкаться в магнитопроводе стержневого тр-ра  
(похоже на  $\Phi_3$  3-й гармоники, но там иная причина и частота  $f_3 = 3f_1$ )  
→  $\Phi_0$  небольшой, в групповом тр-ре  $\Phi_0$  много больше!  
→ вихревые токи в баке (потери)

# Несимметричная нагрузка трансформаторов

Схема Y/Y<sub>0</sub> (с нулевым проводом)

$\Phi_0$  наводит ЭДС  $E_0$  синфазно во всех фазах  $w_1$  и  $w_2$

Уравнения напряжений фаз первичной обмотки

$$\dot{U}_{A\phi} = -\dot{E}_A - \dot{E}_0 + \dot{I}_A Z_1; \quad \dot{U}_{A\phi} \approx -\dot{E}_A - \dot{E}_0;$$

$$\dot{U}_{B\phi} = -\dot{E}_B - \dot{E}_0 + \dot{I}_B Z_1; \quad \text{до 5\% от } U_{\phi}, \quad \dot{U}_{B\phi} \approx -\dot{E}_B - \dot{E}_0;$$

$$\dot{U}_{C\phi} = -\dot{E}_C - \dot{E}_0 + \dot{I}_C Z_1. \quad \text{тогда} \quad \dot{U}_{C\phi} \approx -\dot{E}_C - \dot{E}_0.$$

ЭДС  $E_A, E_B, E_C$  наводятся потоками  $\Phi_{(1)}$  и  $\Phi_{(2)}$

У них могут быть разные значения и  $\Delta\phi$ ,

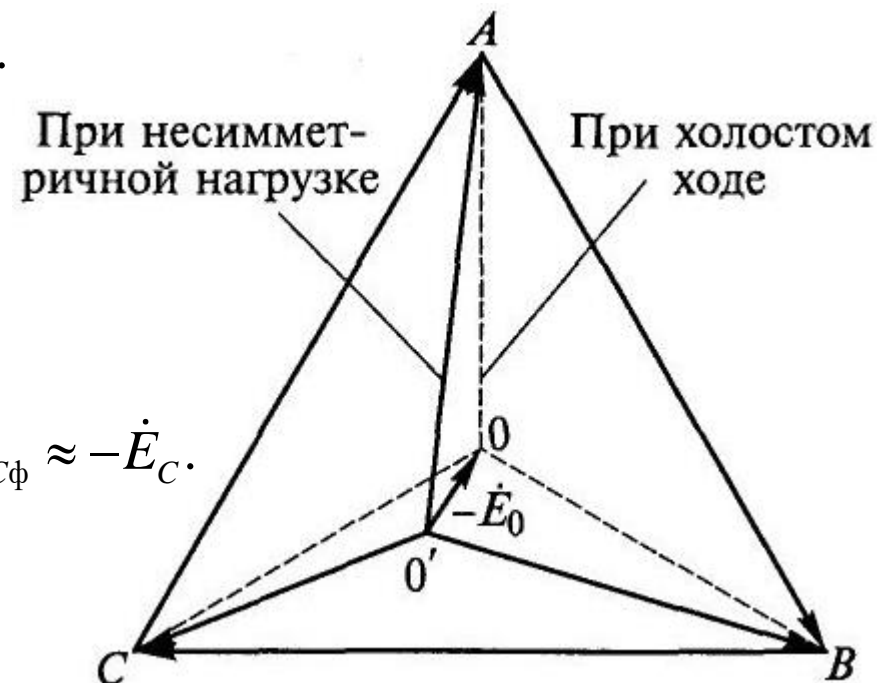
но всегда  $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$

т.к.  $\Phi_{(1)}$  и  $\Phi_{(2)}$  – симметричные системы потоков

При ХХ нет  $I_0$  и  $E_0$ , тогда напряжения  $\dot{U}_{A\phi} \approx -\dot{E}_A; \dot{U}_{B\phi} \approx -\dot{E}_B; \dot{U}_{C\phi} \approx -\dot{E}_C$ .

→ система  $U_{1\phi}$  симметрична:  $\dot{U}_{A\phi} + \dot{U}_{B\phi} + \dot{U}_{C\phi} = 0$

(система  $U_{1л}$  всегда симметрична в сети большой мощности)



# Несимметричная нагрузка трансформаторов

## Схема Y/Y<sub>0</sub> (с нулевым проводом)

При несимметричной нагрузке с  $I_0$  в каждой фазе добавляется  $E_0$

Величина и направление  $E_0$  определяется током  $I_0$  (одинаково в A, B, C)

Звезда первичных  $U_{1\phi}$  – несимметрична!  $\dot{U}_{A\phi} + \dot{U}_{B\phi} + \dot{U}_{C\phi} = -3\dot{E}_0$

Не рекомендуется  
использовать схему Y/Y<sub>0</sub>

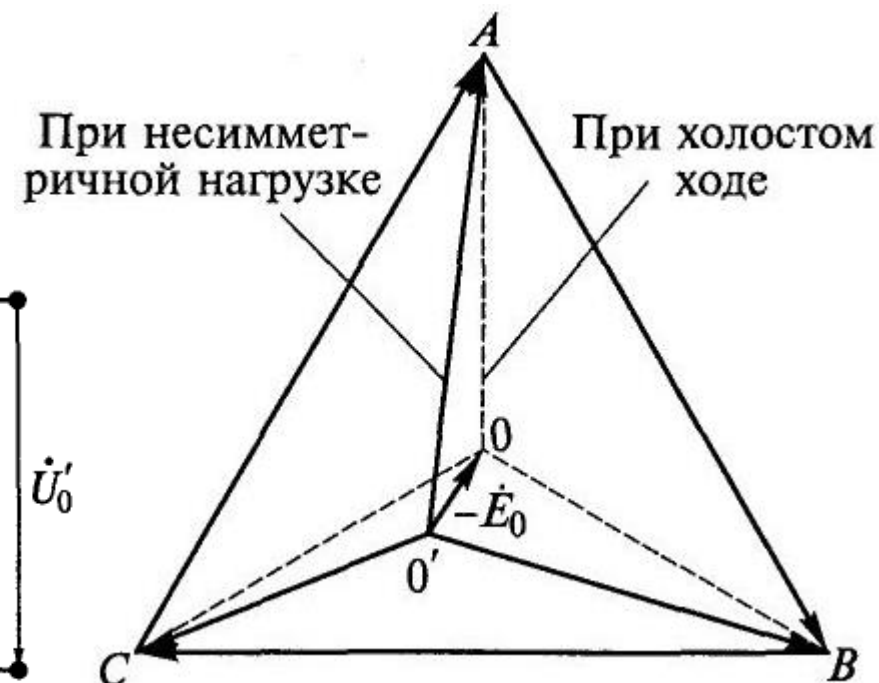
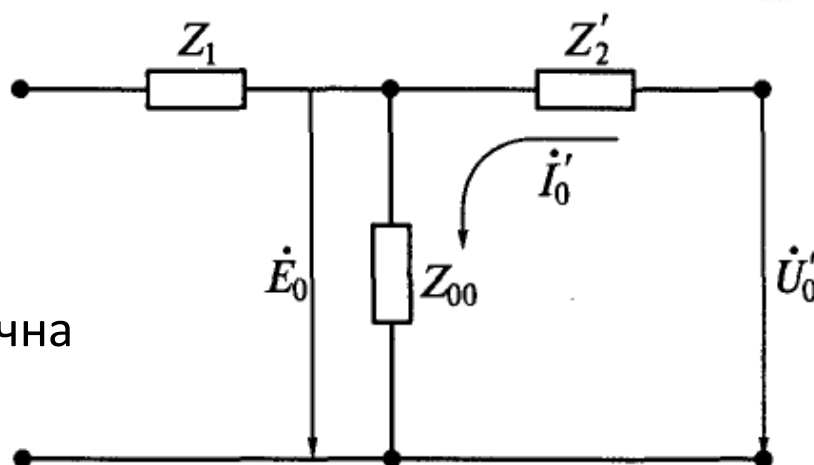
Искажение звезды первичных  $U_{1\phi}$

→ искажение звезды вторичных  $E_{2\phi}$

- разные  $U$  на 1-ф нагрузках разных фаз
- несимметричное питание 3-ф нагрузки

Ток  $I_{2(0)}$  не скомпенсирован  
током первичной цепи

→ схема замещения нулевой  
последовательности аналогична  
схеме режима ХХ



# Несимметричная нагрузка трансформаторов

## Схема $\Delta/Y_0$ (с нулевым проводом)

Ток вторичной цепи  $I_{0Y}$  создает  $\Phi_{0Y}$

→ наводит в первичной цепи  $E_{0\Delta}$

ЭДС  $E_{0\Delta}$  сонаправлена во всех фазах

→ в  $\Delta$ -ке циркулирует ток  $I_{0\Delta}$

Ток первичной цепи  $I_{0\Delta}$  создает  $\Phi_{0\Delta}$   
(противодействующий  $\Phi_{0Y}$ )

Результирующий  $\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_{0Y} + \dot{\Phi}_{0\Delta}$

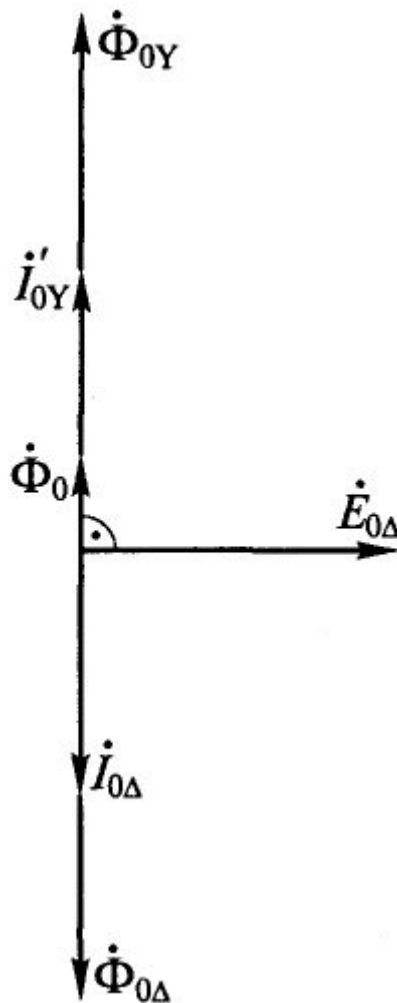
– небольшой

– замыкается по воздуху

→ маленькие ЭДС  $E_0$

→ небольшие искажения  $U_\phi$

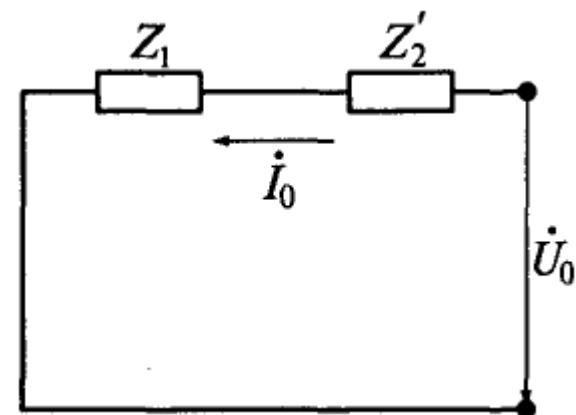
Рекомендуется  
использовать схему  $\Delta/Y_0$



Линейные токи  $I_1$  не содержат  $I_0$

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; I_B = I_{BC} - I_{AB}; I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

Ток  $I_{\Delta 0}$  протекает по  $\Delta$ -ку фаз  
→ схема замещения нулевой последовательности  
аналогична схеме режима КЗ



Компенсационная обмотка ( $\Delta$ ):

- нулевая последовательность  $I, F, \Phi$
- третья гармоника  $I, F, \Phi$

# Несимметричная нагрузка трансформаторов

Измерение сопротивления  $Z_{00}$

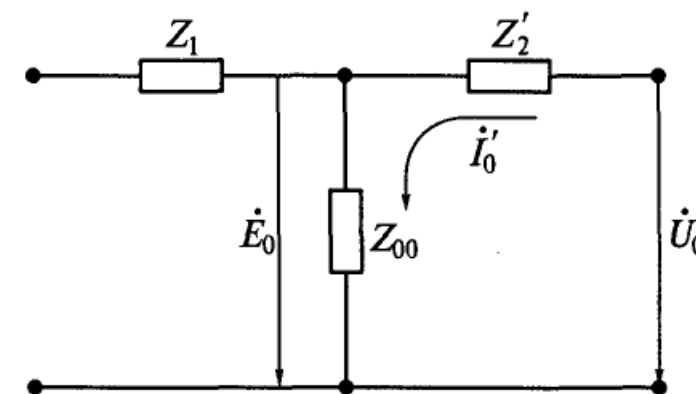
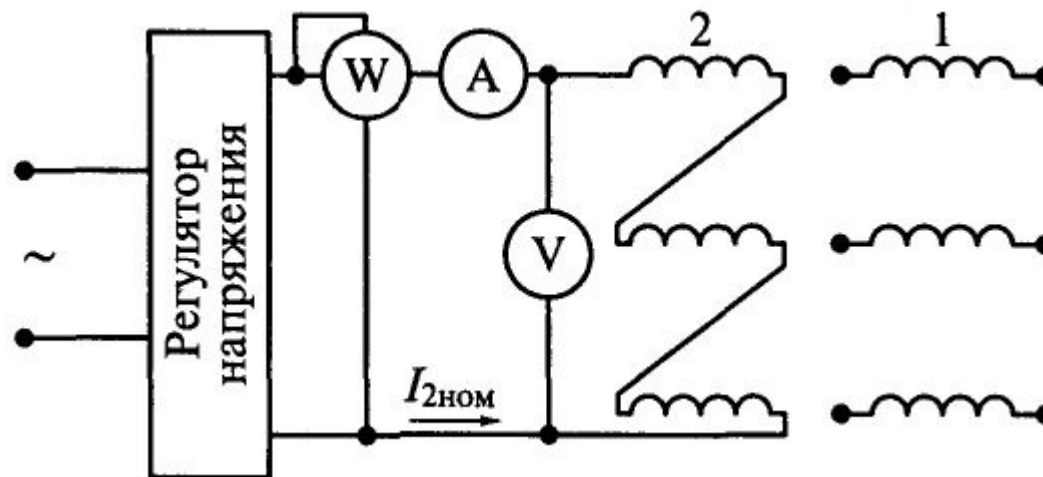
В схеме замещения нулевой последовательности

- $x_{00}$  соответствует потоку  $\Phi_0$  (много меньше  $\Phi_{12}$ )
- $r_{00}$  моделирует потери от вихр.токов от  $\Phi_0$

$Z_{00}$  рассчитать нельзя, но можно измерить

- первичная обмотка разомкнута
- вторичная обмотка – в открытый  $\Delta$ -к
- питание такое, что ток =  $I_{2H}$

Одинаковый ток в фазах  
→ поток, аналогичный  $\Phi_0$   
(имитация нулевой последовательности)



# Несимметричная нагрузка трансформаторов

Измерение сопротивления  $Z_{00}$

Полное сопротивление цепи фазы  $\sqrt{(r'_2 + r_{00})^2 + (x'_2 + x_{00})^2} = \frac{U_0}{3I_0}$

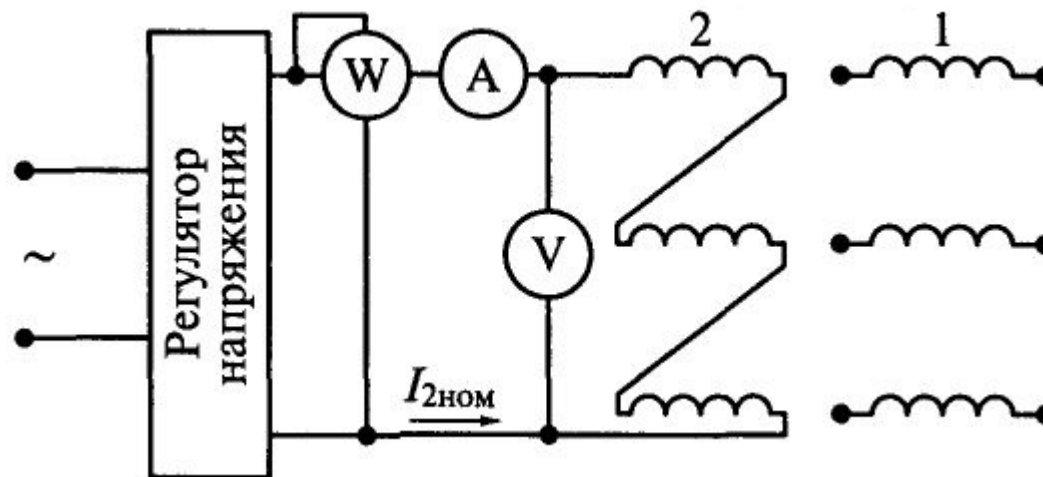
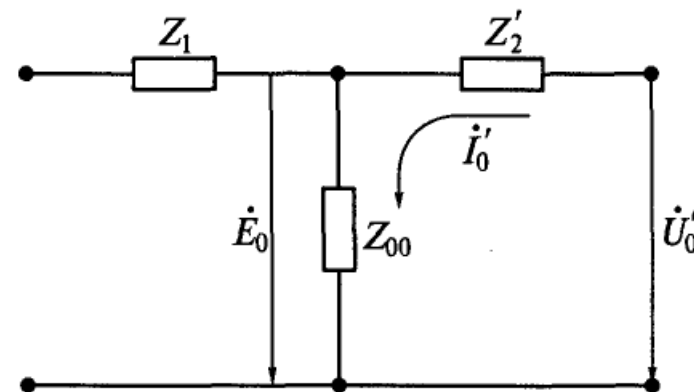
Активное сопротивление  $r'_2 + r_{00} = \frac{P_0}{3I_0^2}$

$r'_2$  и  $x'_2$  найдено расчетом или из опыта КЗ

Тогда можно найти  $r_{00}$  и  $x_{00}$  и  $Z_{00} = \sqrt{r_{00}^2 + x_{00}^2}$

Обычно  $Z_{00} \ll Z_0$

т.к.  $\Phi_0 \ll \Phi_{12}$



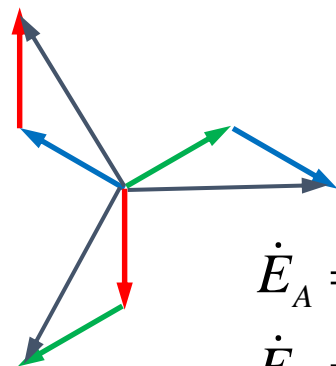
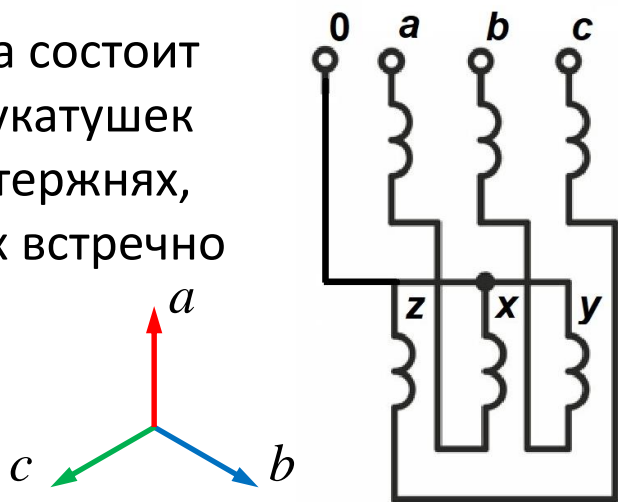


# Несимметричная нагрузка трансформаторов

При наличии  $I_{2(0)}$  возможно использование схемы соединения «зигзаг» (Y / Z)

- трансформаторы распределительных сетей 10 кВ с несимметричной нагрузкой, но Y в первичной цепи
- трансформаторы для выпрямителей

Каждая фаза состоит из двух полукатушек на разных стержнях, включенных встречно



$$\dot{E}_A = -\dot{E}_b + \dot{E}_a$$

$$\dot{E}_B = -\dot{E}_c + \dot{E}_b$$

$$\dot{E}_C = -\dot{E}_a + \dot{E}_c$$

МДС от  $I_{2(0)}$  в стержне направлены встречно  
 $\rightarrow \Phi_0 = 0$

$$-\dot{F}_{b(0)} + \dot{F}_{a(0)} = 0$$

$$-\dot{F}_{c(0)} + \dot{F}_{b(0)} = 0$$

$$-\dot{F}_{a(0)} + \dot{F}_{c(0)} = 0$$

- для получения  $U_{2H}$  расходуется на 15% витков больше, чем в Y
- изготовление сложнее  $\rightarrow$  трансформатор дороже
- отсутствие  $\Phi_0 \rightarrow$  более равномерное распределение несимметричной нагрузки НН между фазами первичной сети ВН

# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Специальные трансформаторы

# Трехобмоточные трансформаторы

Многообмоточный тр-р: несколько выходных обмоток на разные напряжения

В энергетике – трехобмоточные тр-ры (например, 500/220/110 кВ)

Все обмотки рассчитаны на 100% мощность

Рекомендованные группы соединения

$Y_0/Y_0/\Delta-0-11$  и  $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$  (группа: ВН-СН и ВН-НН)

Уравнения напряжений (приведены к  $w_1$ )

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

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

$$\dot{U}'_3 = \dot{E}'_3 - \dot{I}'_3 Z'_3.$$

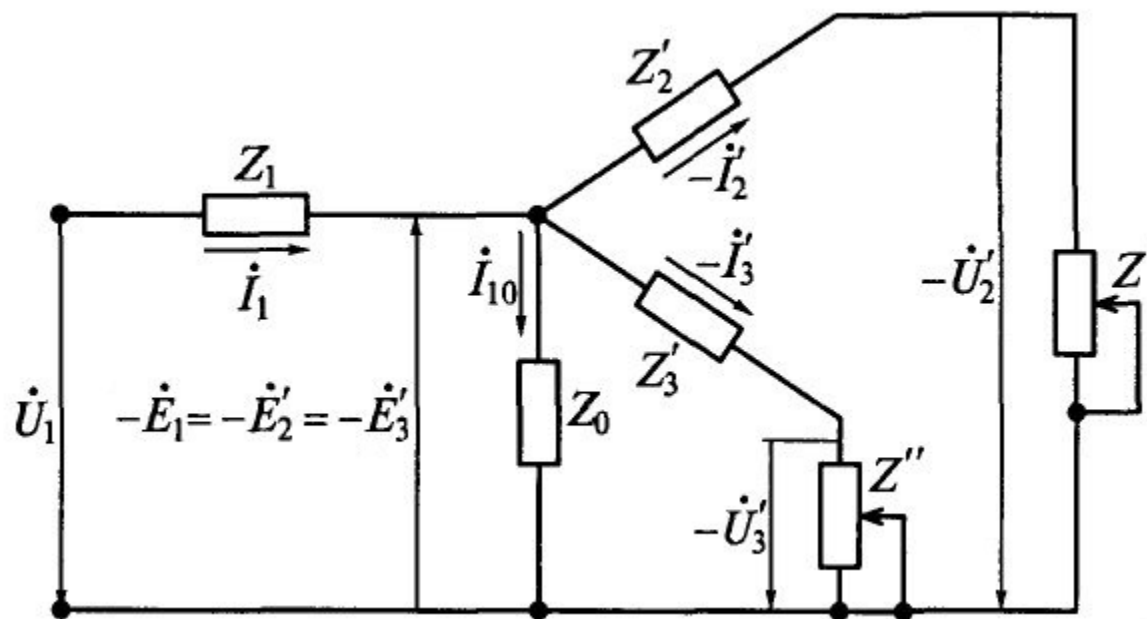
Намагничивающий ток  $\dot{I}_{10} = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3$

приближенно  $\dot{I}_1 \approx (-\dot{I}'_2) + (-\dot{I}'_3)$

Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. – М. Академия, 2013 (параграф 5.1)

Токарев Б.Ф. Электрические машины. – М. Альянс, 2015 (параграф 8.1)

Схема замещения



# Трехобмоточные трансформаторы

Особенности трехобмоточного тр-ра

Взаимное влияние вторичных обмоток:

- изменение  $Z'$  и увеличение  $I'_2 \rightarrow$  увеличение  $I_1$
- $\rightarrow$  увеличение  $I_1 Z_1$
- $\rightarrow$  снижение  $E_1 = E'_2 = E'_3$
- $\rightarrow$  снижение  $I'_3$

Параметры вторичных обмоток неодинаковы

- $\rightarrow$  токи не совпадают по фазе
- $\rightarrow$  алгебраическая сумма  $I'_2 + I'_3 > I_1$
- $\rightarrow$  сумма полных мощностей  $S_2 + S_3 \neq S_1$

Определение параметров схемы замещения:

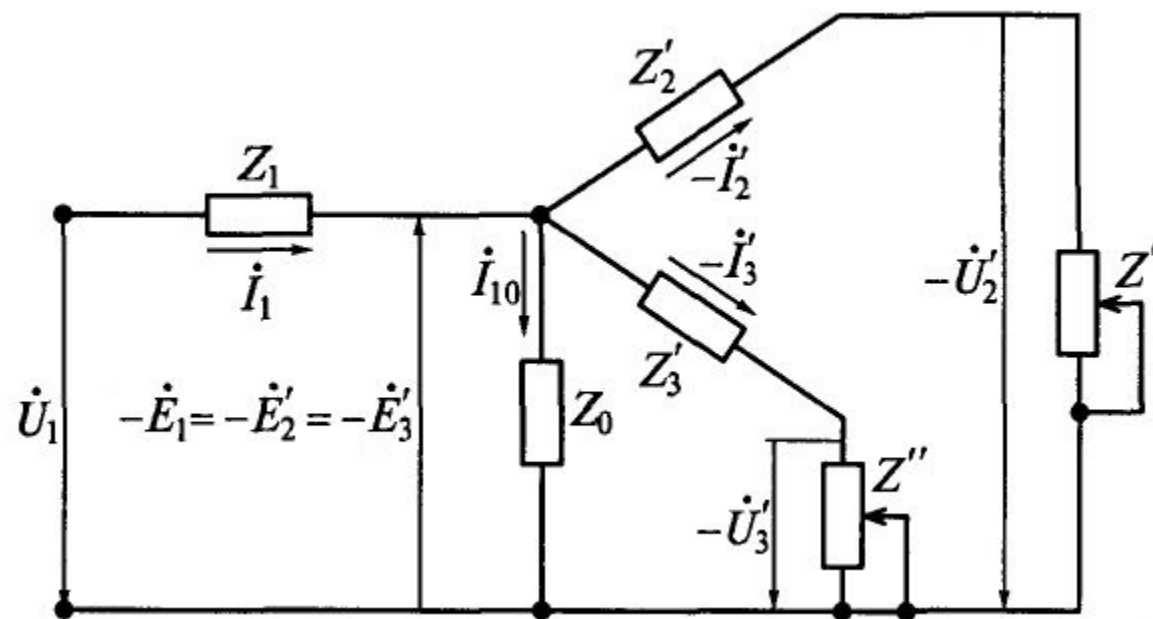
опыт ХХ и 3 опыта КЗ:

- $U_1 = U_c; U_2 = 0; U_3$  разомкнута
- $U_1 = U_c; U_2$  разомкнута;  $U_3 = 0$
- $U_1$  разомкнута;  $U_2 = U_c; U_3 = 0$

Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. – М. Академия, 2013 (параграф 5.1)

Токарев Б.Ф. Электрические машины. – М. Альянс, 2015 (параграф 8.1)

Схема замещения



# Автотрансформатор

Тр-р, имеющий электрическую связь между обмотками

Автотр-р экономичнее тр-ра при  $k_T \leq 2,5$

- связь сетей 110/220 кВ, 220/500 кВ
- лабораторный атр регулируемый (ЛАТР)
- бытовые приборы 220 / 127 В



Рассмотрим повышающий Атр

$U_1 \rightarrow$  ток в  $w_1 \rightarrow$  поток  $\Phi \rightarrow$  ЭДС в  $w_1$  и доб.ЭДС в витках  $x-a$

Нагрузка ( $U_2$ ) – между  $X$  и  $a$  :  $U_2 > U_1$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{U}_\Delta$$

$U_1 \approx E_1$ ,  $U_\Delta \approx E_\Delta$ , все ЭДС созданы одним  $\Phi$

$\rightarrow$  можно суммировать алгебраически  $U_2 \approx U_1 + U_\Delta$

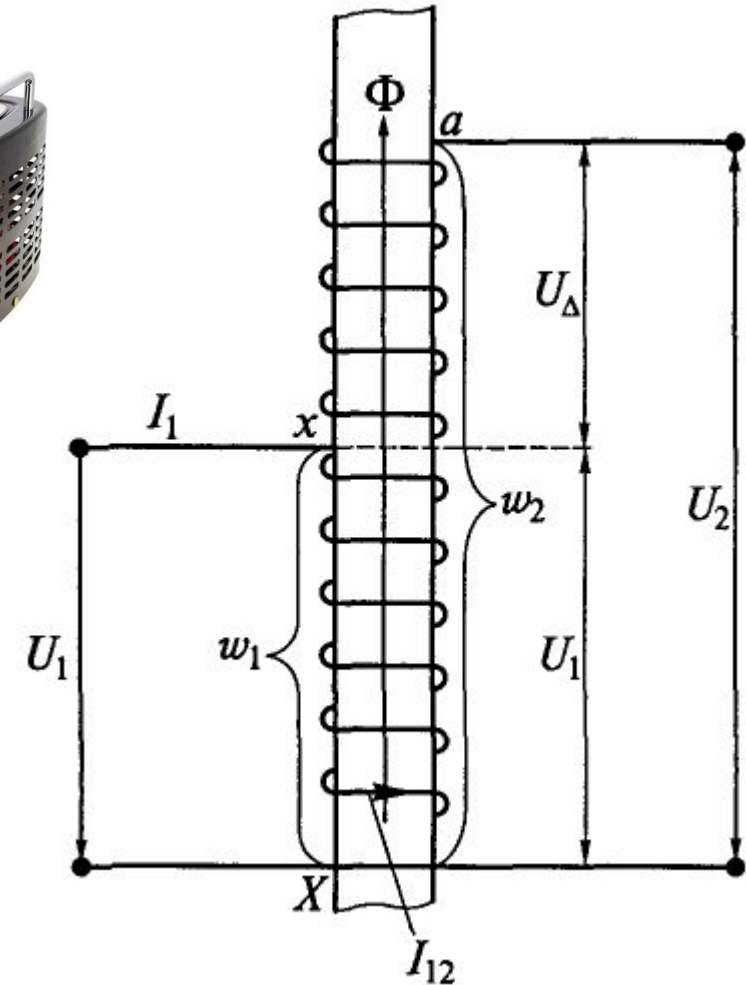
Ток  $I_2$  почти в противофазе с  $I_1$

В обмотке  $w_1$   $\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$  – очень мал

$\rightarrow w_1$  можно выполнять из тонкого провода

(экономия меди – снижение стоимости)

(окно магнитопровода тоже меньше – меньше стали)



# Автотрансформатор

Сумма МДС обмоток = МДС ХХ

$$\dot{I}_{12}w_1 + \dot{I}_2(w_2 - w_1) = \dot{F}_{10}$$

Пренебрегая намагничивающим током и потерями в стали ( $F_{10} = 0$ )

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2 \left( 1 - \frac{w_2}{w_1} \right) = \dot{I}_2 \left( 1 - \frac{1}{k_T} \right)$$

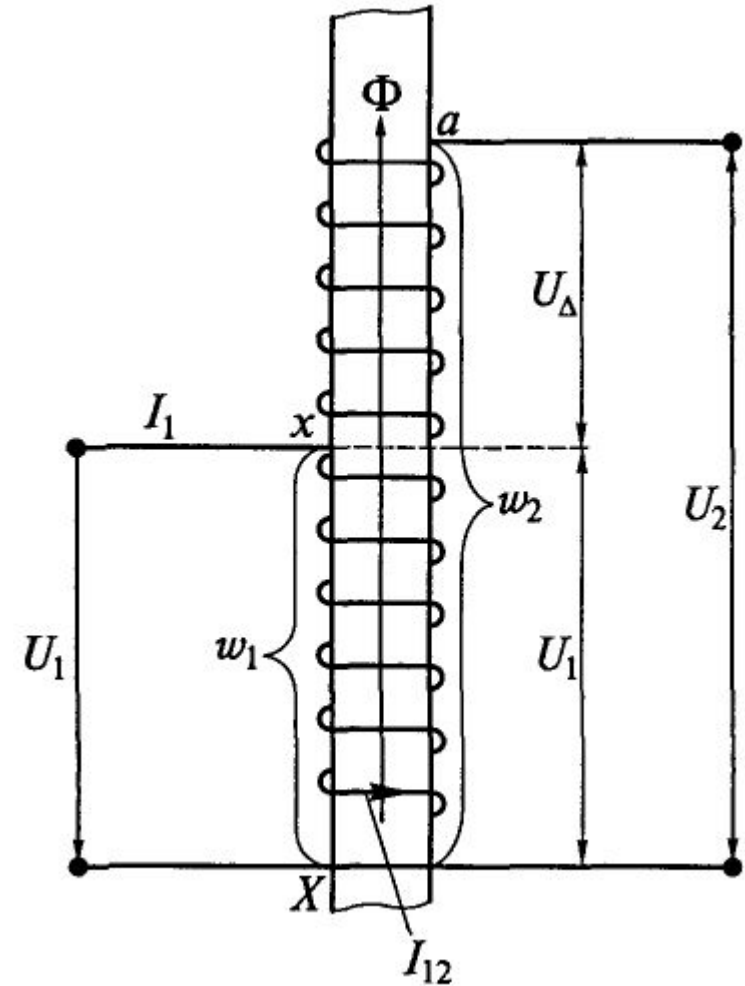
Чем ближе  $k_T$  к 1,  
тем меньше  $I_{12}$   
и меньше меди

Наличие эл.связи между обмотками:  
часть мощности передается электрическим путем ( $S_{\Theta}$ ),  
другая часть – электромагнитным ( $S_{ЭМ}$ )

Полная (проходная) мощность 1-ф атр

$$S = S_{\Theta} + S_{ЭМ} \approx U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

ЭМ мощность – расчетная, габаритная  
(определяет размеры, расход материалов, стоимость)



# Автотрансформатор

Электромагнитная мощность передается ЭМ путем между обмотками

Электромагнитная мощность  $\approx$  полной мощности каждой обмотки

$$S_{\text{ЭМ}} = E_1 I_{12} = E_{\Delta} I_2 \rightarrow U_1 I_{12} \approx U_{\Delta} I_2$$

В обычном трансформаторе вся мощность - электромагнитная

$$S_{\text{тр}} = E_1 I_1 = E_2 I_2 \rightarrow U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

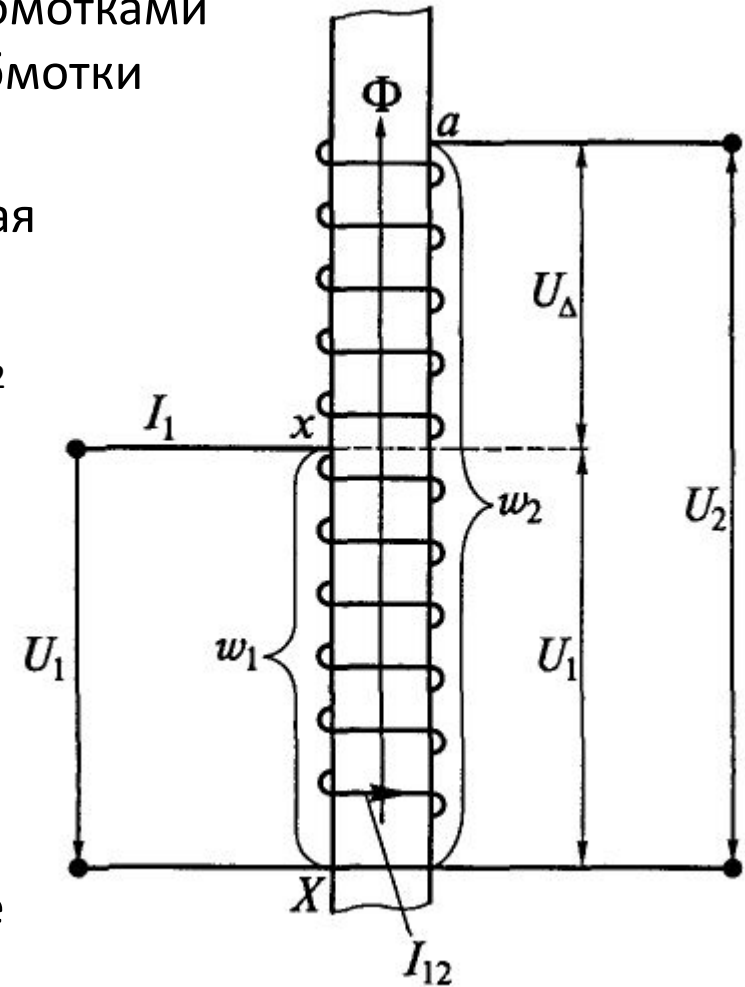
Сравним Атр и тр-р с равными проходными мощностями  $U_2 I_2$

$$\frac{S_{\text{ЭМ}}}{S_{\text{тр}}} = \frac{U_{\Delta} I_2}{U_2 I_2} \approx \frac{U_2 - U_1}{U_2} \approx 1 - \frac{w_1}{w_2} = 1 - k_{\text{т}}$$

Тогда  $S_{\text{ЭМ}} = S_{\text{тр}} (1 - k_{\text{т}})$

Чем ближе  $k_{\text{т}}$  к 1, тем меньше расчетная/габаритная мощность, тем больше преимущество автотрансформатора

При одинаковых полных мощностях в Атр меньше  $S_{\text{ЭМ}}$   
→ меньше активных материалов, меньше потери, КПД выше



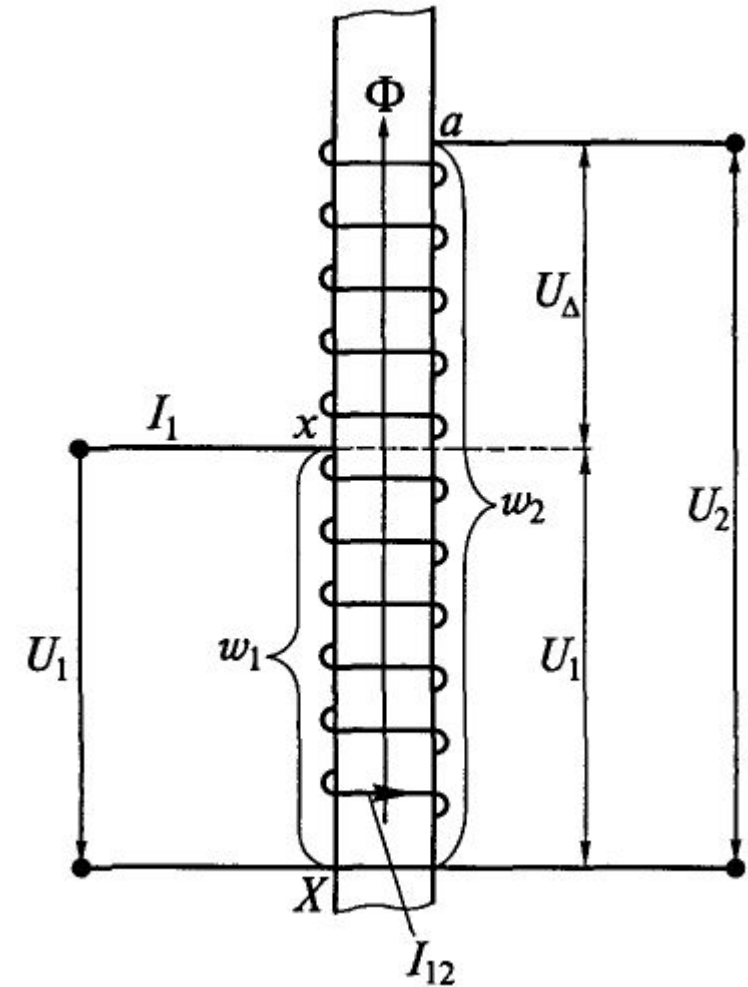
# Автотрансформатор

Особенности КЗ автотрансформатора

При  $U_2 = 0$  ток КЗ протекает по части обмотки  $x - a$   
сопротивление КЗ = сопротивление части обмотки ( $w_2 - w_1$ )  
(в тр-ре  $Z_k = Z_1 + Z'_2$ , т.е.  $Z_k$  Атр меньше  $Z_k$  тр-ра)

Недостатки автотрансформатора

- $u_k$  Атр меньше, чем в тр-ре  $\rightarrow$  ток КЗ больше
- электрическая связь обмоток  $\rightarrow$  везде должна использоваться изоляция ВН (по условиям электробезопасности)
- возможна только группа соединения 0





# ТРАНСФОРМАТОРЫ

Переходные процессы в  
трансформаторах

# Включение трансформатора на ХХ

Однофазный тр-р подключаем к сети с напряжением  $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0)$   
( $\alpha_0$  – начальная фаза, рад.)

Уравнение баланса напряжений  $u_1 = i_0 R_1 - e_1 = i_0 R_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}$  – нелинейное диф. ур-е, т.к.  $\Phi = f(i_0)$

При малых  $i_0$  можно принять  $w_1 \Phi = L_1 i_0$ ,  
где  $L_1$  – полная индуктивность обмотки  $w_1$

тогда  $w_1 \frac{d\Phi}{dt} + \frac{w_1 \Phi}{L_1} R_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0)$  – линейное неоднородное диф. ур-е

Его решение  $\Phi(t) = \Phi_{\text{св}} + \Phi_{\text{уст}}$

- свободная составляющая  $\Phi_{\text{св}} = C_0 e^{-\frac{t}{T_0}}$   
(общее решение однородного диф. ур-я)

$T_0 = \frac{L_1}{R_1}$  – постоянная времени затухания  $\Phi_{\text{св}}$

- установившаяся составляющая

$$\Phi_{\text{уст}} = \Phi_m \sin\left(\omega t + \alpha_0 - \frac{\pi}{2}\right)$$

Постоянную интегрирования  $C_0$  найдем из нач. условий

$$\Phi_{t=0} = \Phi_{\text{св}} + \Phi_{\text{уст}} = C_0 - \Phi_m \cos(\alpha_0) = \Phi_{\text{ост}}$$

Тогда  $C_0 = \Phi_m \cos \alpha_0 + \Phi_{\text{ост}}$

Свободная составляющая  $\Phi_{\text{св}} = (\Phi_m \cos \alpha_0 + \Phi_{\text{ост}}) e^{-\frac{t}{T_0}}$

# Включение трансформатора на ХХ

Изменение потока при переходном процессе

$$\Phi(t) = (\Phi_m \cos \alpha_0 + \Phi_{\text{ост}}) e^{-\frac{t}{T_0}} - \Phi_m \cos(\omega t + \alpha_0)$$

Процесс зависит от нач. фазы  $\alpha_0$  напряжения (и  $\Phi$ ):

- при  $\alpha_0 = \pi/2$   $\Phi_{\text{св}} = \Phi_{\text{ост}} \approx 0$  и  $\Phi(t) = \Phi_{\text{уст}}$  (без переходного процесса)
- при  $\alpha_0 = 0$  – наихудший вариант

$\Phi_{\text{св}}$  – тах и в противофазе с  $\Phi_{\text{уст}}$

→  $\Phi(t)$  нарастает

$\Phi_{\text{ост}}$  может достигать  $0,5\Phi_m$

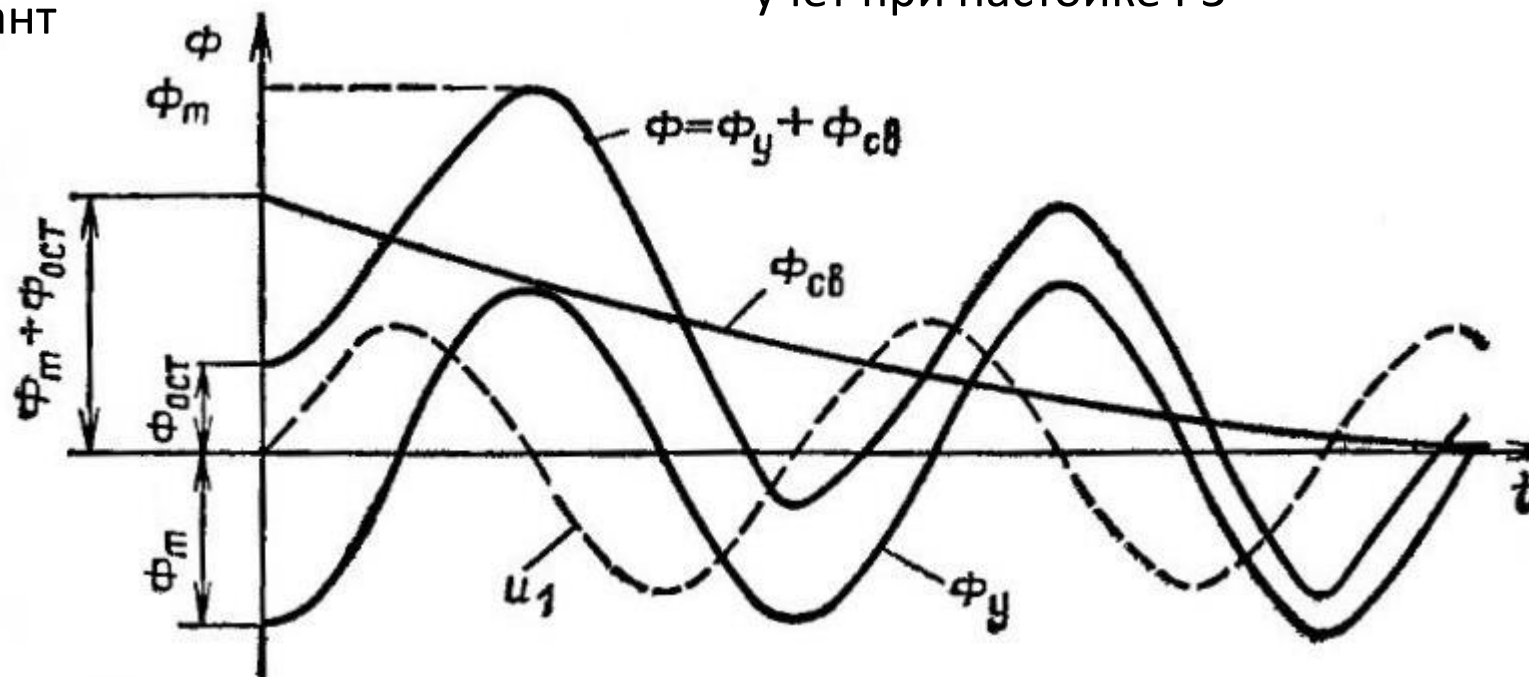
→  $\Phi(t)$  достигает  $2...2,5 \Phi_m$

через  $\omega t \approx \pi$

Двукратный  $\Phi_m$  →  
намагничивающий ток

$$i_0(t) = 100...120 I_0 \text{ или } 2...5 I_{1н}$$

- кратковременно (не опасно по  $t^\circ$ )
- учет при настройке РЗ



## Внезапное КЗ

КЗ на зажимах  $w_2$  маловероятно, но наиболее опасно  
Пренебрегая  $I_{12}$  используем схему замещения опыта КЗ

$$u_1 = i_{1K} R_K - e_K = i_{1K} R_K + L_K \frac{di_{1K}}{dt} \quad u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_K)$$

где  $R_K = R_1 + R'_2$ ;  $L_K = (x_1 + x'_2) / \omega$ ;  $\alpha_K$  – нач. фаза

Решение уравнения  $i_{1K}(t) = i_{1K,св} + i_{1K,уст}$

- уст. составляющая  $i_{1K,уст} = I_{1km} \sin(\omega t + \alpha_K - \varphi_K)$

где  $I_{1km} = U_{1m} / Z_K$ ,  $\varphi_K$  – угол между  $i$  и  $u$

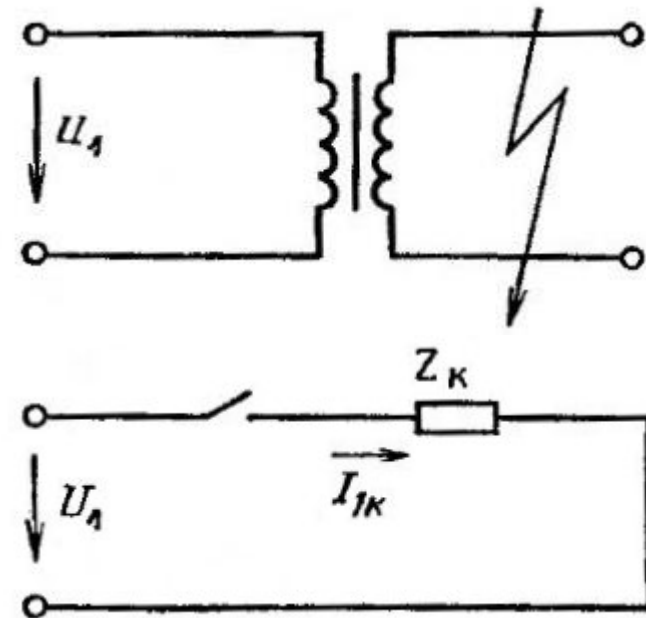
- своб. составляющая  $i_{1K,св} = C_K e^{-\frac{t}{T_K}}$

где  $T_K = L_K / R_K$  – постоянная времени при КЗ

Постоянную интегрирования  $C_K$  найдем из нач.условий:

В случае КЗ при ХХ ( $i_{1K} = 0$ )  $i_{1K,t=0} = C_K + I_{1km} \sin(\alpha_K - \varphi_K)$

Тогда  $C_K = -I_{1km} \sin(\alpha_K - \varphi_K)$



# Внезапное КЗ

Изменение тока при переходном процессе КЗ

$$i_{1к}(t) = -I_{1км} \sin(\alpha_k - \varphi_k) e^{-\frac{t}{T_k}} + I_{1км} \sin(\omega t + \alpha_k - \varphi_k)$$

Процесс зависит от нач. фазы  $\alpha_k$  напряжения:

- при  $\alpha_k = \varphi_k$   $i_{1к,св} = 0$  и  $i_{1к}(t) = I_{1км} \sin(\omega t)$  (без переходного процесса)
- при  $\alpha_k = \varphi_k + \pi/2$  – наихудший вариант

$i_{1к}(t)$  через полпериода ( $\omega t = \pi$ ) достигает наибольшего значения

– Ударный ток КЗ

$$i_{уд} = -I_{1км} \left( 1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_k}} \right)$$

коэффициент ударного тока  $k_{уд} = 1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_k}}$

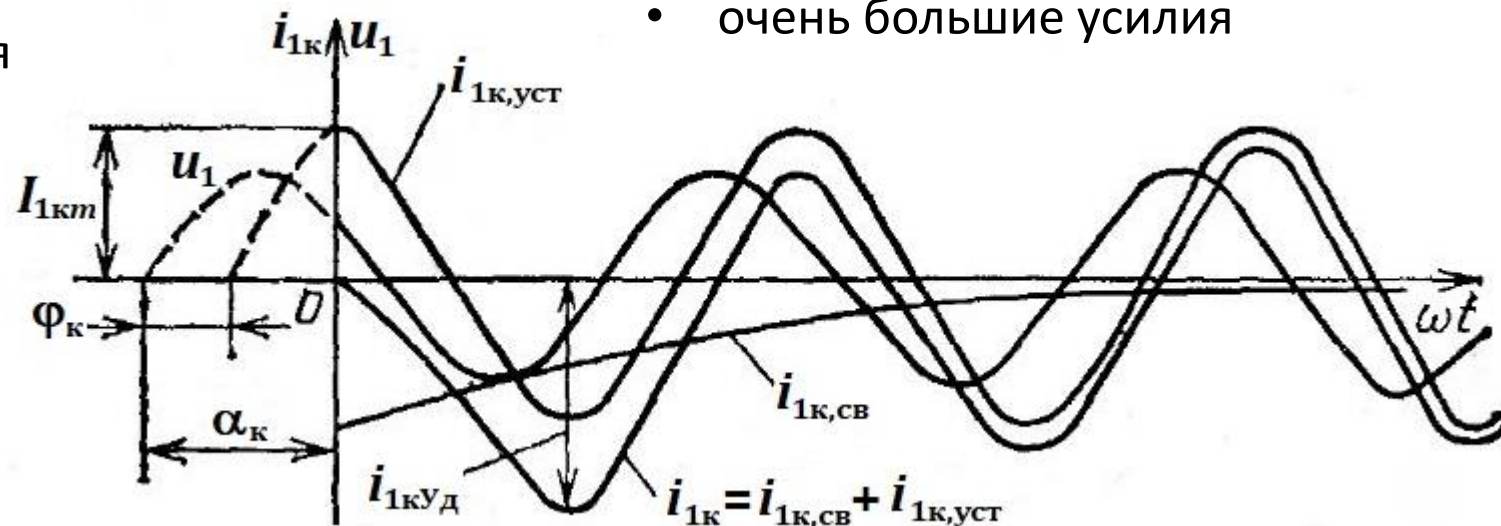
$k_{уд} = 1,2 \dots 1,8$  (в пределе – 2,0)

Установившийся ток КЗ

$$I_{1км} = \frac{U_{1м}}{Z_k} = \frac{\sqrt{2}U_{1н}}{Z_k} \frac{I_{1нм}}{\sqrt{2}I_{1н}} = \frac{Z_6}{Z_k} I_{1нм} = \frac{1}{u_k} I_{1нм}$$

Например, при  $u_k = 4,5\%$   $I_{1км} = 22 I_{1нм}$ , ударный ток до  $40 I_{1нм}$

- кратковременно (защита отключит через 3...4 периода)
- очень большие усилия



# Внезапное КЗ

Взаимодействие токов – электромагнитные силы

$$f_{\text{эм}} = B_{\sigma} i_{1\text{к}} l$$

т.к. индукция  $B_{\sigma} \sim$  току  $i_{1\text{к}}$  то  $f_{\text{эм}} \sim i_{1\text{к}}^2$

При КЗ силы взаимодействия возрастают в 1000 раз  
Допустимые механические напряжения до 50-60 н/мм<sup>2</sup>

В пределах катушки:

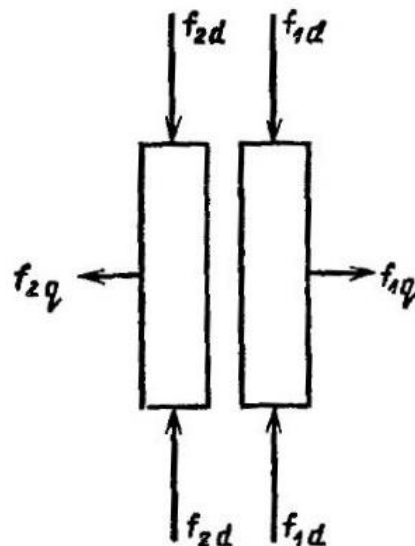
токи витков сонаправлены  $\rightarrow f_{\text{эм}}$  сжимает витки

Обмотки ВН и НН:

токи  $i_1$  и  $i_2$  противоположны

$\rightarrow$  ВН растягивается,

НН сжимается





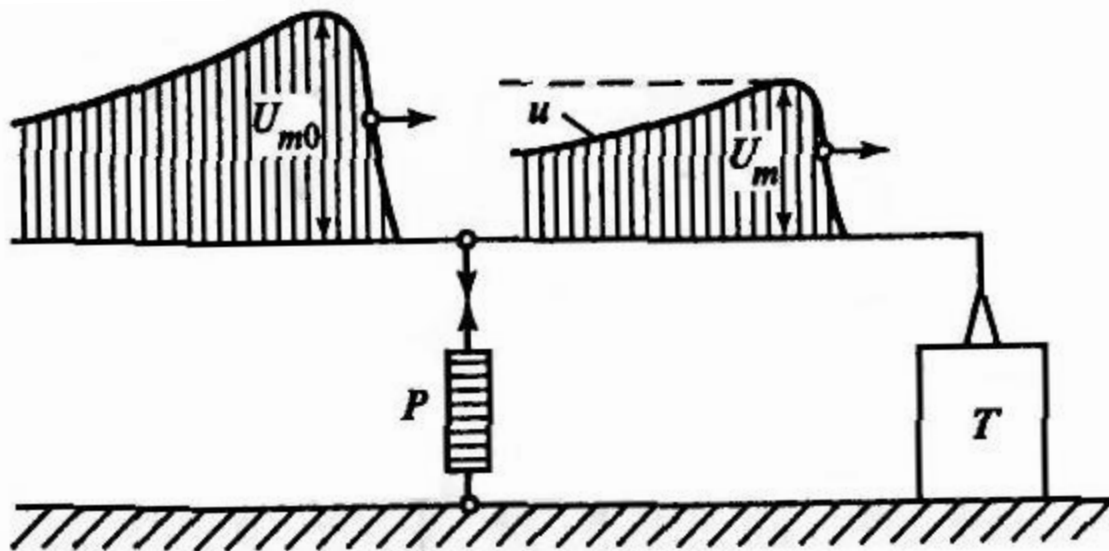
# Перенапряжения в трансформаторах

Импульсы напряжения в сетях – перенапряжения (до  $3,5 U_{1н}$ )

- коммутация компонентов системы
- КЗ, дуговые замыкания на землю

Атмосферные перенапряжения – молния в ЛЭП, наведенная в ЛЭП волна напряжения от грозового разряда (до  $10 U_{1н}$ )

Иванов-Смоленский А.В.  
Электрические машины. Том 1.  
– М.: Издательский дом МЭИ,  
2006 (Глава 15)



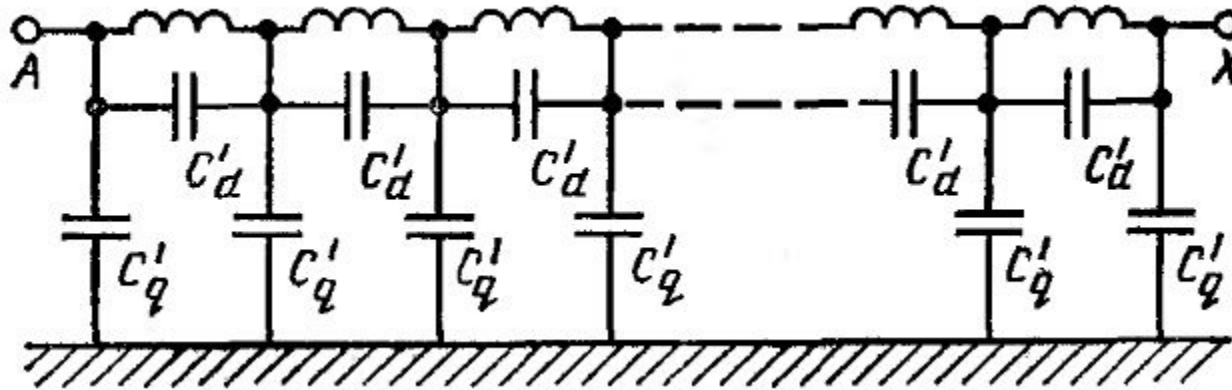
Фронт волны очень крутой – аналогично включению тр-ра на напряжение с частотой 200...250 кГц → надо учитывать емкостные связи между витками, катушками, между обмоткой и сердечником и баком

- индуктивные сопр. велики  $x_L = 2\pi fL$
- емкостные сопр. уменьшаются  $x_C = \frac{1}{2\pi fC}$

Ёмкости существенно влияют на распределение токов и напряжений в тр-ре

# Перенапряжения в трансформаторах

Схема замещения обмотки с учетом продольных емкостей  $C'_d$  между катушками и поперечных емкостей  $C'_q$  на бак/сердечник



Полная продольная емкость  $C_d = \frac{1}{\sum 1/C'_d} = \frac{C'_d}{n}$

Полная поперечная емкость  $C_q = \sum C'_q = C'_q n$

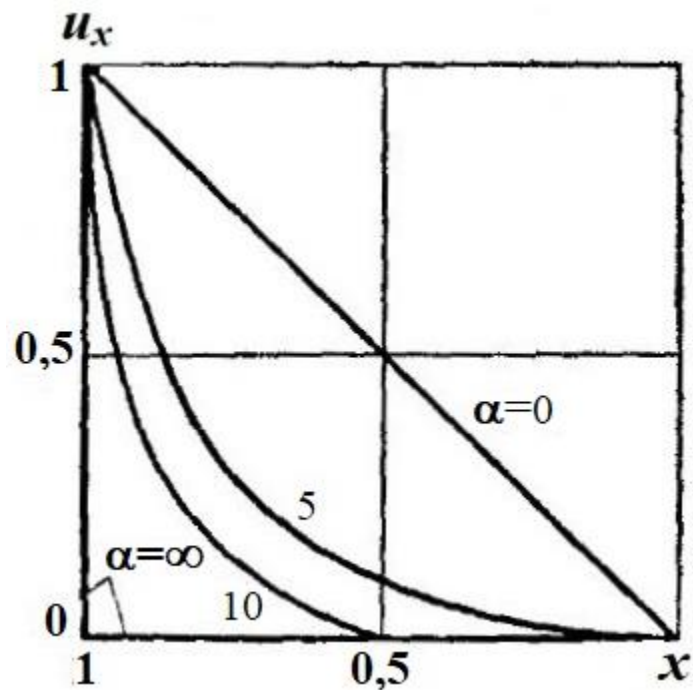
Степень неравномерности  $\alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}}$

Обычно  $C_q > C_d$  и  $\alpha = 5 \dots 15$



# Перенапряжения в трансформаторах

Фронт волны  $U \rightarrow$  начальное распределение напряжения  
вдоль обмотки в зависимости от  $\alpha$



Неравномерное начальное распределение  $u_x$   
 $\rightarrow$  перенапряжения начальных катушек

Конечное распределение  $u_x$  – прямолинейное  
(аналогично  $\alpha = 0$ )

Между ними – колебательный процесс  
(высокочастотный, затухающий)

В переходном процессе  
 $\rightarrow$  перенапряжения в разных частях обмотки

Опасность повреждения изоляции

# Перенапряжения в трансформаторах

Меры защиты от перенапряжений

Усиление изоляции входных и концевых катушек ВН

Применение емкостной защиты (тр-ры 110 кВ и выше)

- емкостное кольцо (1)
- экранирующие витки (2)
- все подключено к линейному концу обмотки (3)  
(кольцо и витки разомкнуты – от вихр.токов)

Подбор доп.емкостей (1) и (2)

→ уменьшение  $\alpha$ ,

снижение неравномерности

распределения  $u_x$

См. «грозоупорные трансформаторы»

