

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы

Лекция 8

Дмитриев Степан Александрович



УГТУ-УПИ

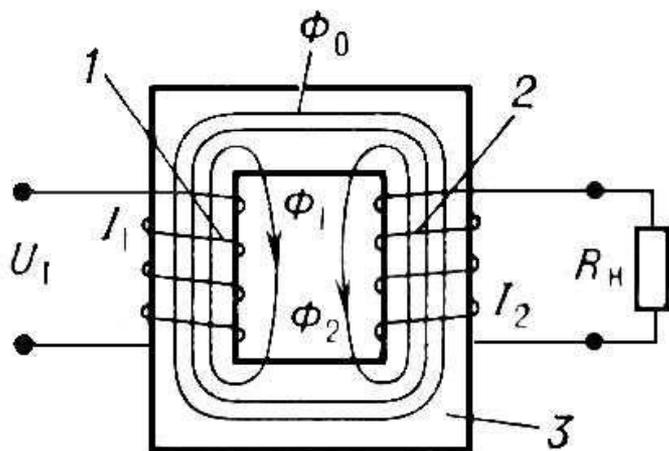
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Основные разделы лекции :

- Конструктивное выполнение трансформаторов и автотрансформаторов
- Системы охлаждения трансформаторов
- Трансформаторы с расщепленными обмотками
- Особенности автотрансформаторов
- Режимы работы нейтралей
- Износ изоляции и срок службы трансформаторов
- Нагрузочная способность трансформаторов
 - Предельная температура обмотки
 - Нормирование перегрева
 - Методы определения нагрузочной способности (ГОСТ 14209-97)
 - Регулирование напряжения
 - РПН
 - ПБВ
 - Выбор числа и мощности трансформаторов на ПС

Силовой трансформатор

Силовой трансформатор – электрический аппарат, предназначенный для преобразования трехфазного переменного тока одного класса напряжения в трехфазный переменный ток другого класса.

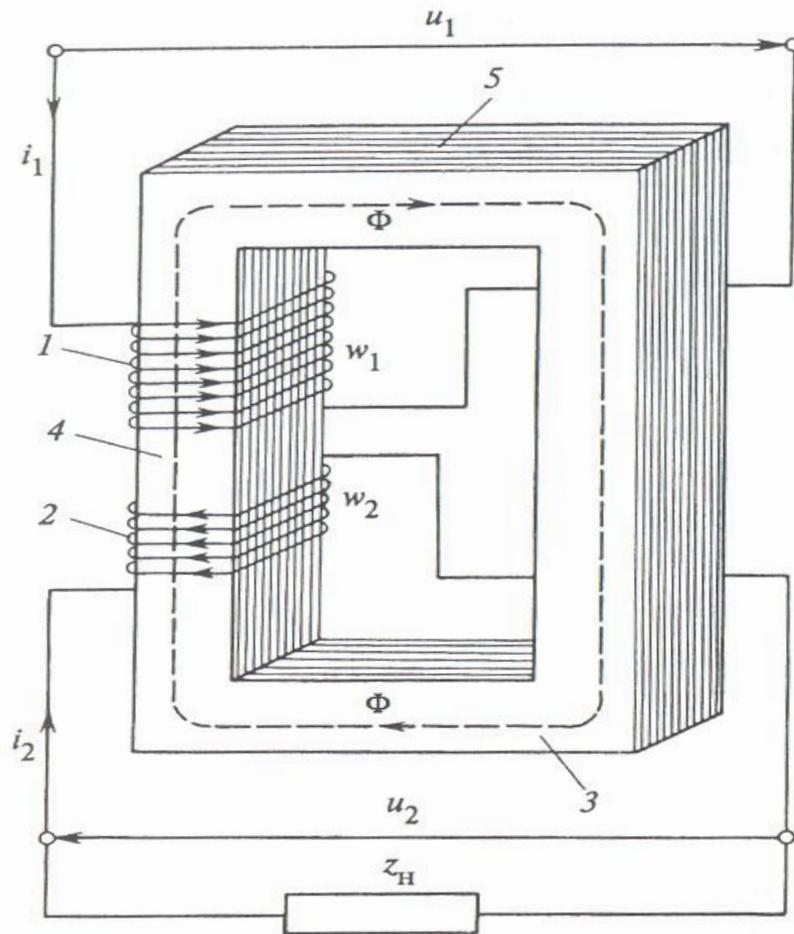


Передача электрической энергии из первичной обмотки во вторичную осуществляется посредством переменного магнитного потока Φ .

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции

$$E \sim d\Phi/dt$$

Конструкция силового трансформатора



1 – первичная обмотка с числом витков w_1
2 – вторичная обмотка с числом витков w_2
3, 4, 5 – магнитопровод:

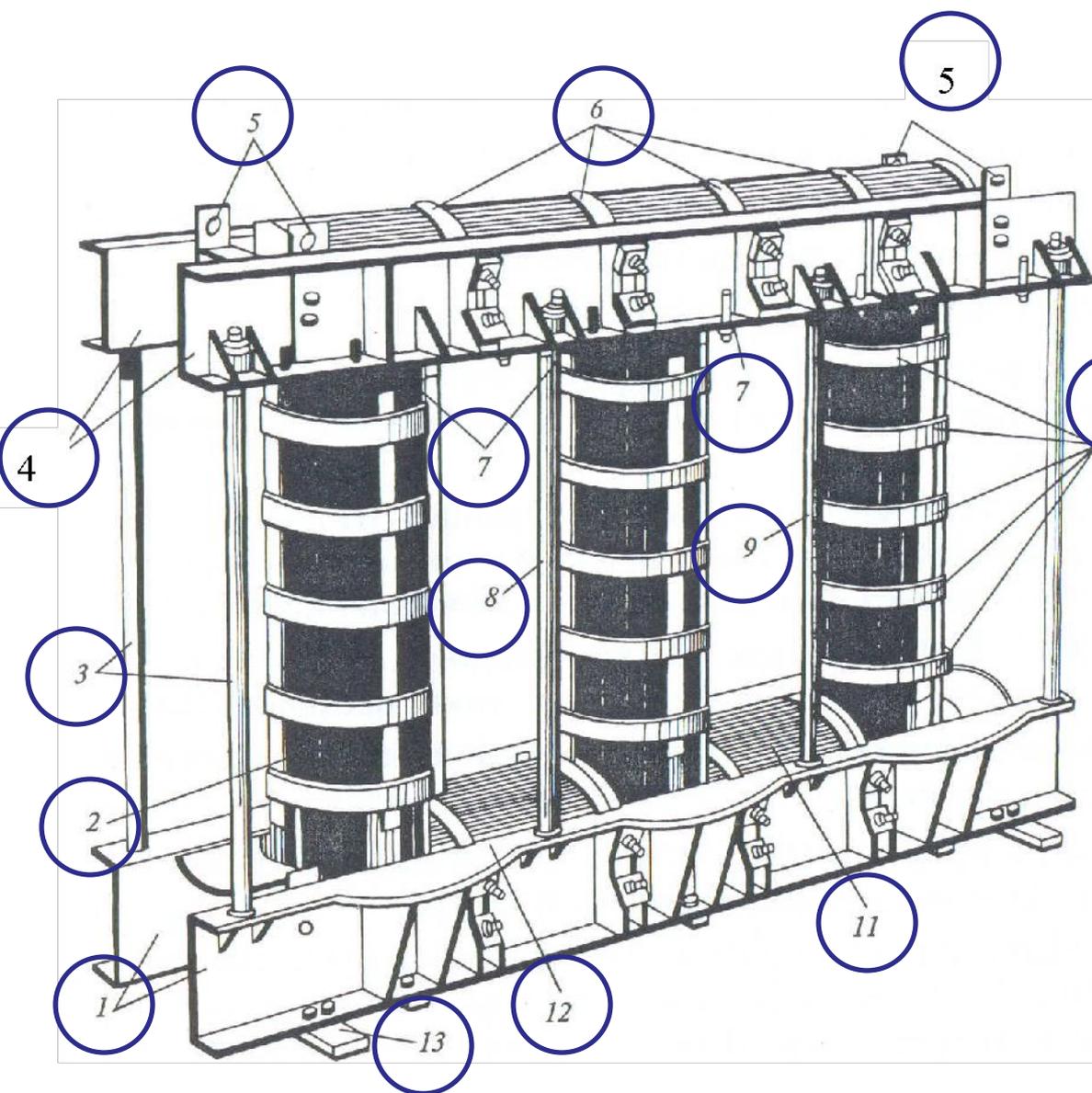
4 – стержень магнитопровода
3, 5 – ядро магнитопровода

$$k_m = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Конструкция силового трансформатора

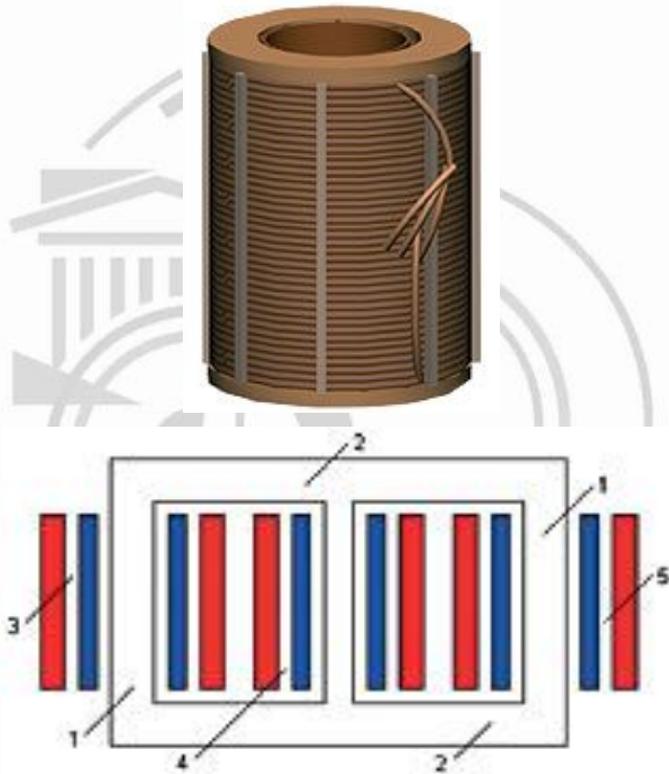


- **Магнитопровод** предназначен для:
 - усиления электромагнитной связи
 - крепления обмоток, отводов и т.д.
- Магнитопровод выполнен из листов электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм. Листы изолируются жаростойкими покрытиями, или лаковыми пленками



- 1, 4 - нижние и верхние
ярмовые балки;
- 2 - стержень
магнитопровода;
- 3 - связующие шпильки
с
бумажно-
бакелитовыми трубками
на крайних стержнях;
- 5 - подъемные планки;
- 6 - полу бандажи;
- 7 - винты для
подпрессовки обмоток;
- 8, 9 - стягивающие
шпильки между
стержнями;
- 10 - стекло бандажи,
- 11 - нижнее ярмо;
- 12 - фасонные полки для
опоры обмоток;
- 13 - стальные опорные
пластины

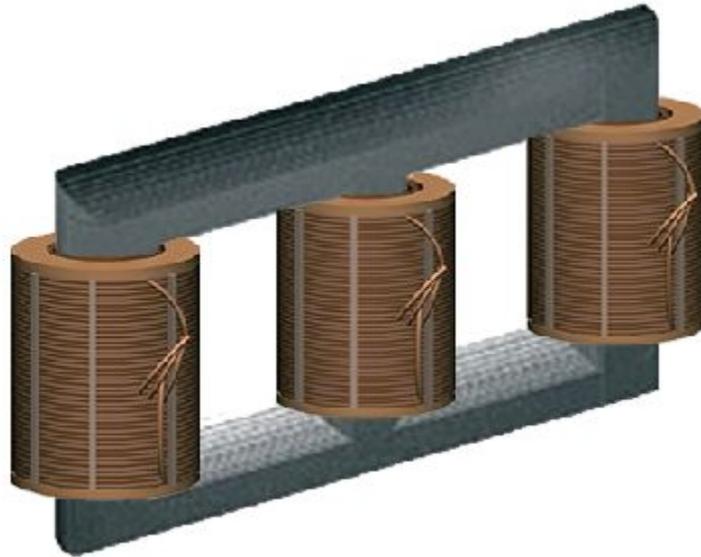
Конструкция силового трансформатора



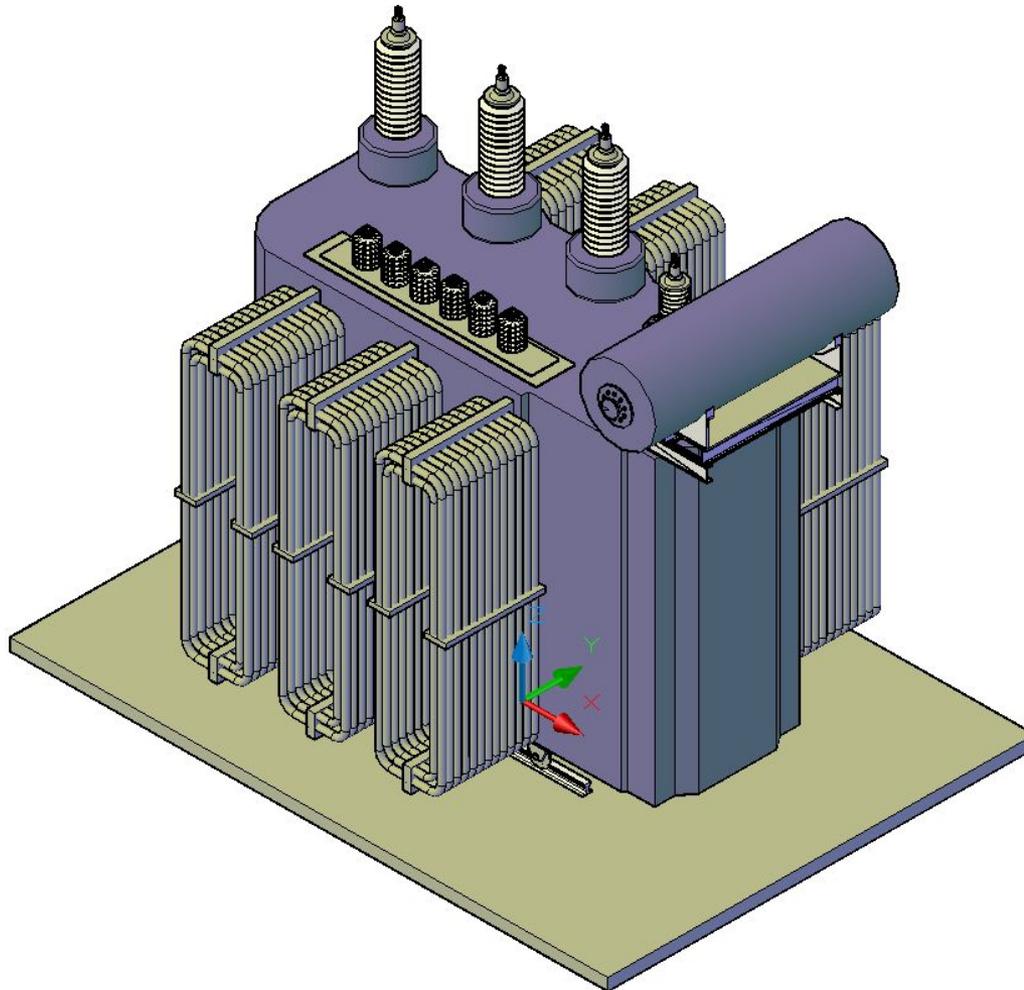
1, 2 – Магнитопровод; 3 – Обмотка НН;
4 – Изоляция; 5 – Обмотка ВН

- Обмотка трансформатора представляет собой часть электрической цепи (первичной и вторичной), состоящая из:
 - проводникового материала (обмоточный провод, медный или алюминиевый);
 - изоляционных деталей.

Конструкция силового трансформатора

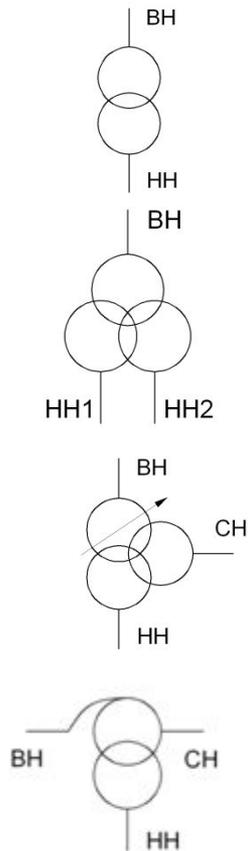


Конструкция силового трансформатора



Силовые трансформаторы

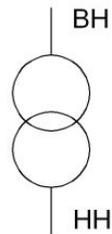
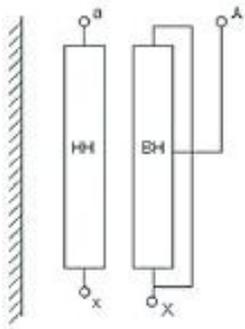
- Классификация трансформаторов



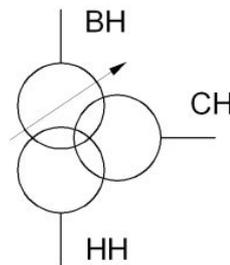
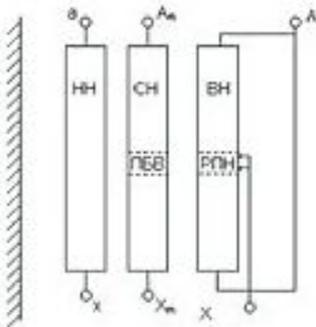
- Двухобмоточные
- Двухобмоточные с расщеплением
- Трехобмоточные
- Автотрансформаторы

Силовые трансформаторы

- **Обмотки трансформаторов**



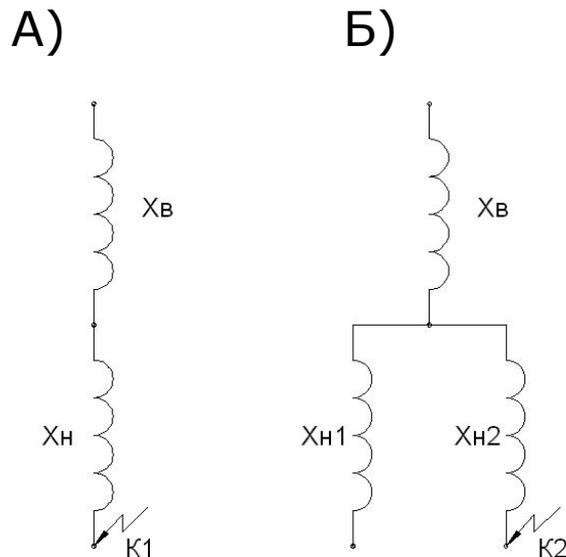
- **Двухобмоточный**



- **Трехобмоточный с РПН по стороне ВН и ПБВ со стороны СН**

Силовые трансформаторы

- Расщепление обмотки НН



$$X_T = X_B + X_H$$

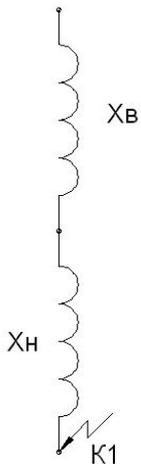
- А) Схема двухобмоточного трансформатора
- Б) Схема двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

Силовые трансформаторы

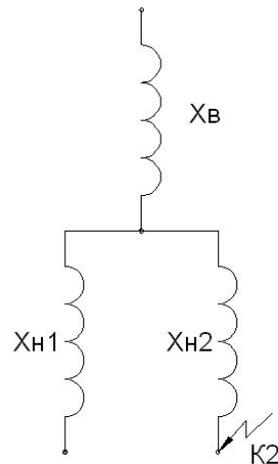
- Расщепление обмотки НН

$$X_T = X_B + X_H$$

А)



Б)



$$X_T = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}}$$

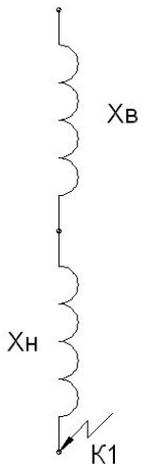
- А) Схема двухобмоточного трансформатора
- Б) Схема двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

Силовые трансформаторы

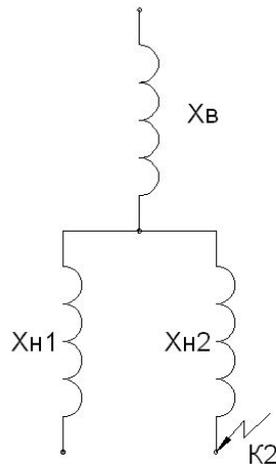
- Расщепление обмотки НН

$$X_T = X_B + X_H \qquad X_T = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}}$$

А)



Б)



$$X_B = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot 0,125$$

А) Схема двухобмоточного трансформатора

Б) Схема двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

Силовые трансформаторы

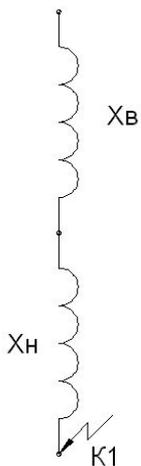
- Расщепление обмотки НН

$$X_T = X_B + X_H \qquad X_T = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}}$$

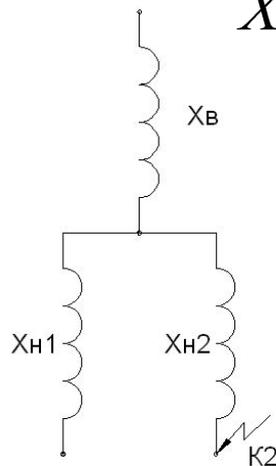
$$X_B = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot 0,125$$

$$X_H = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot 0,875$$

А)



Б)



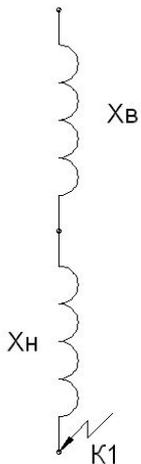
А) Схема двухобмоточного трансформатора

Б) Схема двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

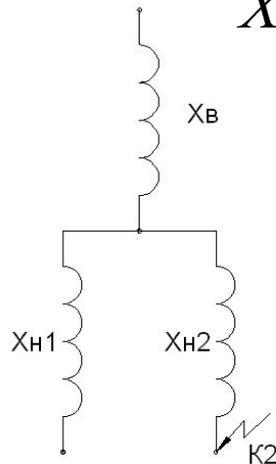
Силовые трансформаторы

- Расщепление обмотки НН

А)



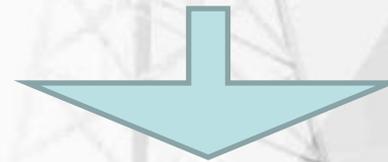
Б)



$$X_T = X_B + X_H \qquad X_T = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}}$$

$$X_B = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot 0,125 \qquad X_H = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot 0,875$$

$$X_H = \frac{X_{H1} \cdot X_{H2}}{X_{H1} + X_{H2}}$$



А) Схема двухобмоточного трансформатора

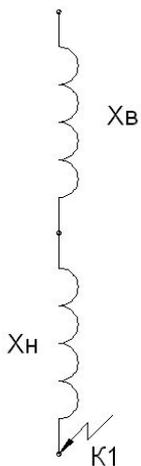
Б) Схема двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

$$X_{H1} = X_{H2} = \frac{u_{K\%} \cdot U_{НОМ}}{100 \cdot S_{НОМ}} \cdot 1,75$$

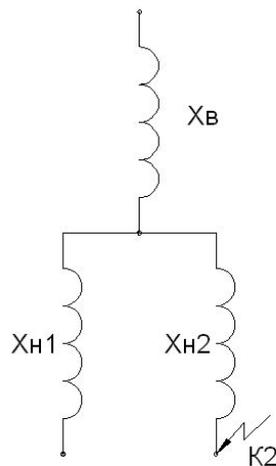
Силовые трансформаторы

- Расщепление обмотки НН

А)



Б)



Для двухобмоточного трансформатора

$$X_T = \frac{u_{K\%} \cdot U_{ном}}{100 \cdot S_{ном}} \cdot 1$$

Для двухобмоточного трансформатора с расщеплением

$$X_T = \frac{u_{K\%} \cdot U_{ном}}{100 \cdot S_{ном}} \cdot 1,875$$

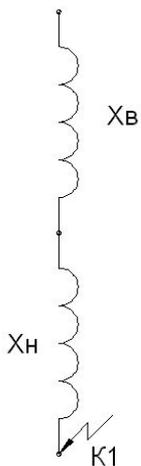
А) Схема двухобмоточного трансформатора

Б) Схема двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

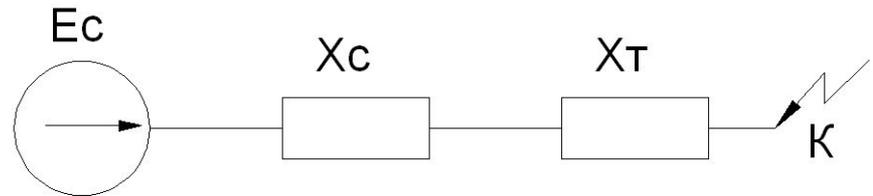
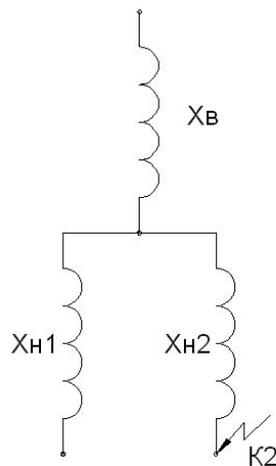
Силовые трансформаторы

- **Расщепление обмотки НН**

А)



Б)



Ток К3:

$$I_{K3} = \frac{E}{X_{\Sigma}}$$



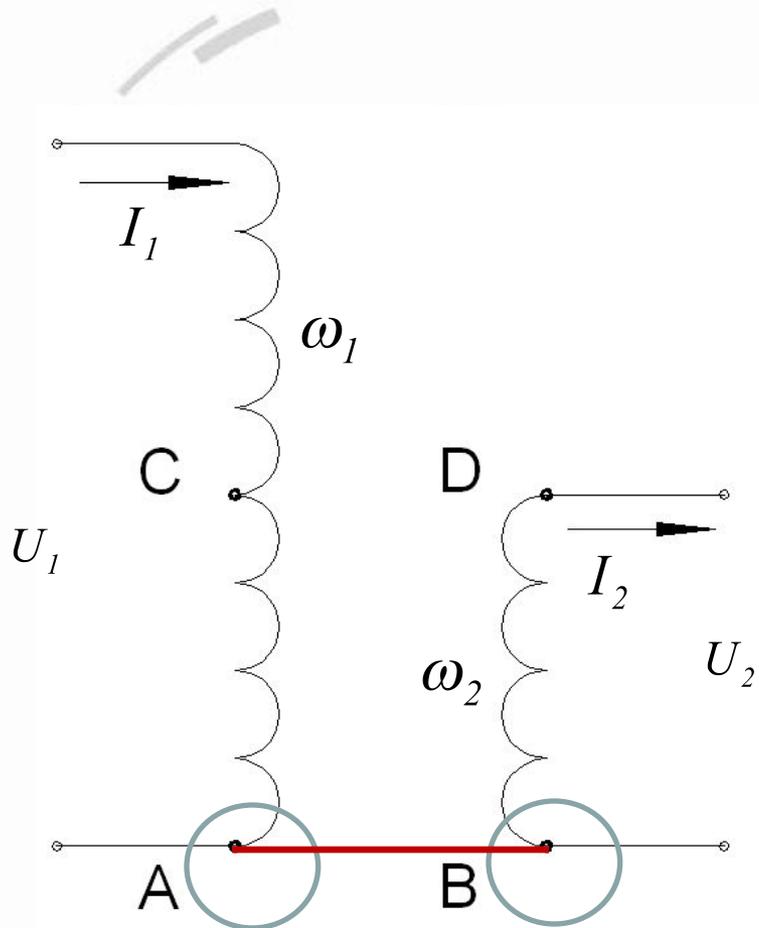
$$I_{K3.K1} > I_{K3.K2}$$

А) Схема двухобмоточного трансформатора

Б) Схема двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН

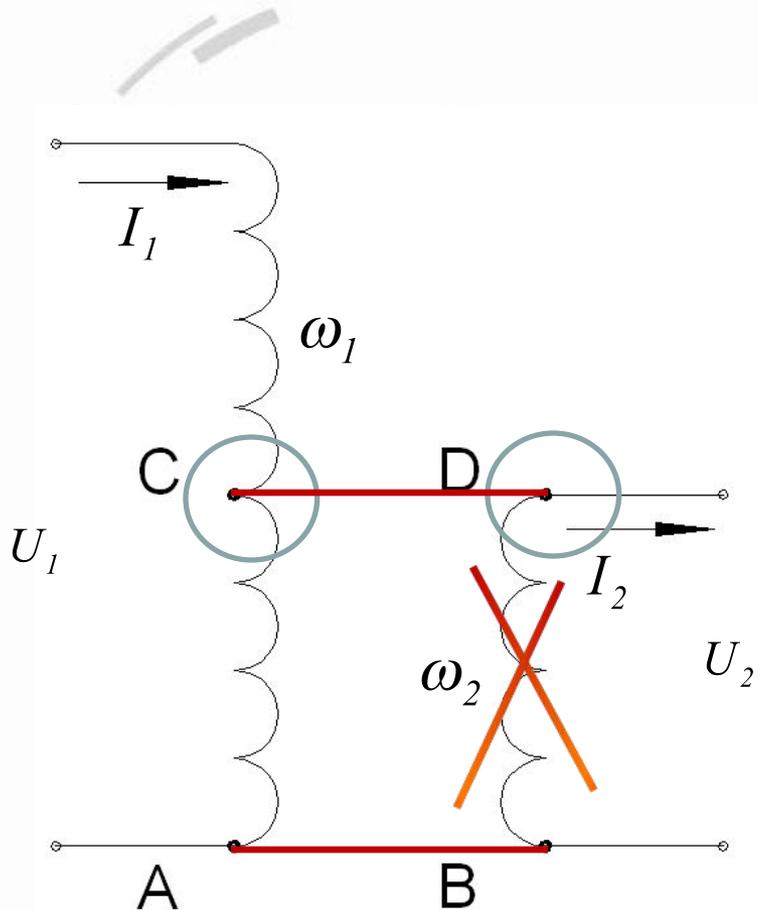
Силовые трансформаторы

- Особенности автотрансформаторов



Силовые трансформаторы

- Особенности автотрансформаторов



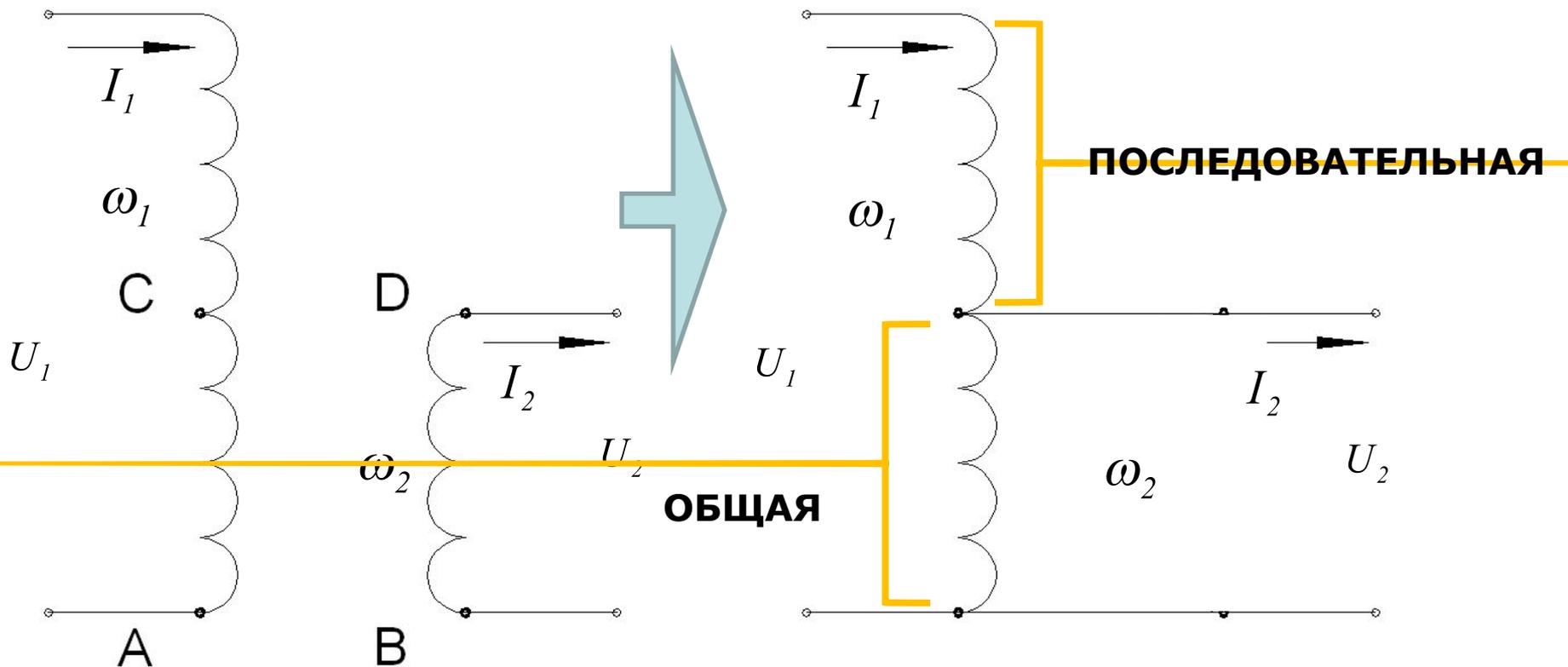
$$k_m = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Напряжение на один виток обмотки

$$u = U_1 / \omega_1 = U_2 / \omega_2 = \text{const}$$

Силовые трансформаторы

- Особенности автотрансформаторов



Силовые трансформаторы

- Особенности автотрансформаторов

Особенностью автотрансформатора является наличие электрической связи между обмотками.

Часть мощности передается электромагнитным путем, а часть — электрическим

Силовые трансформаторы

- Особенности автотрансформаторов

Общая обмотка:

$$\omega_o = \omega_2,$$

$$U_o = U_2,$$

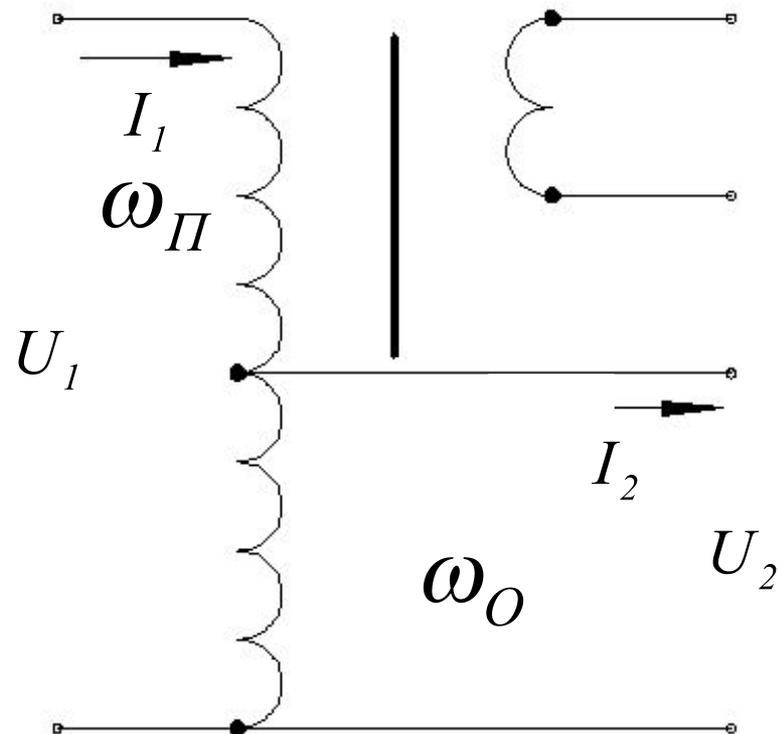
$$I_o = I_2 - I_1$$

Последовательная обмотка:

$$\omega_n = \omega_1 - \omega_2,$$

$$U_n = U_1 - U_2,$$

$$I_n = I_1$$



Силовые трансформаторы

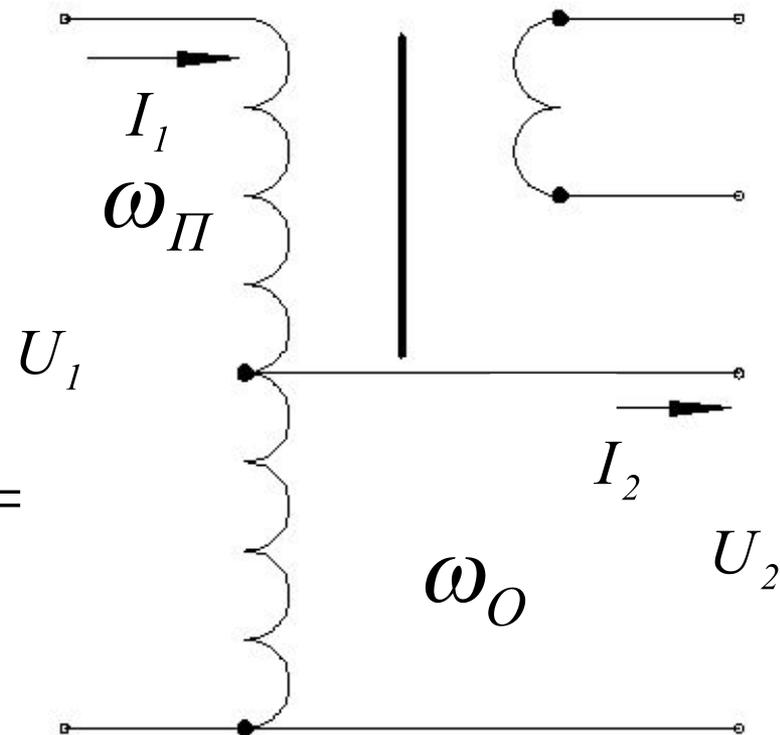
- Особенности автотрансформаторов

Мощность последовательной обмотки

$$S_n = \sqrt{3} U_n I_n = \\ = \sqrt{3} I_1 (U_1 - U_2);$$

$$U_2 = U_1 / k_m$$

$$S_n = \sqrt{3} U_1 I_1 (1 - 1/k_m) = \\ = S_n k_v = S_{min};$$

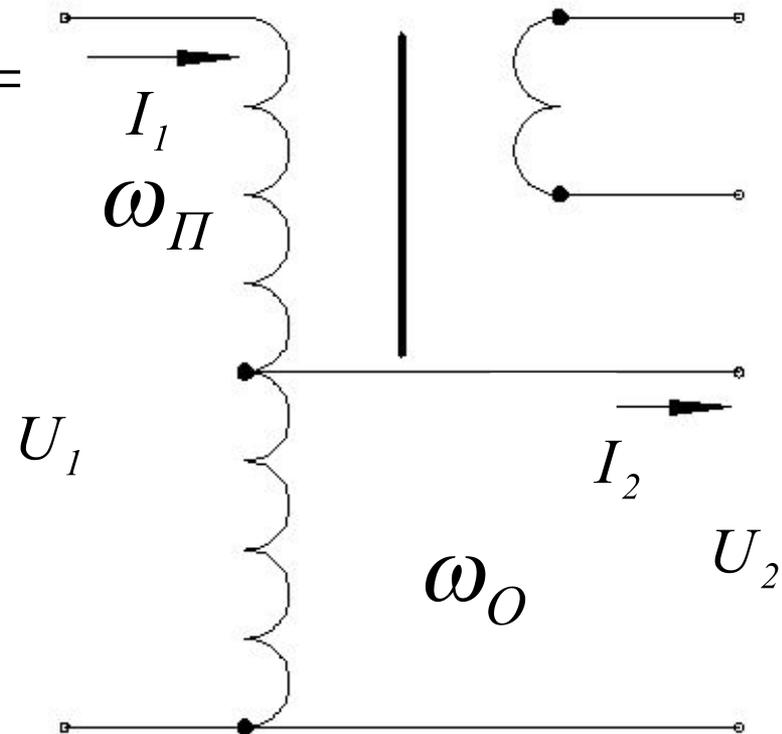


Силовые трансформаторы

- Особенности автотрансформаторов

Мощность общей обмотки

$$S_o = \sqrt{3} U_2 I_2 (1 - 1/k_m) = \\ = S_n k_v = S_{min};$$



Силовые трансформаторы

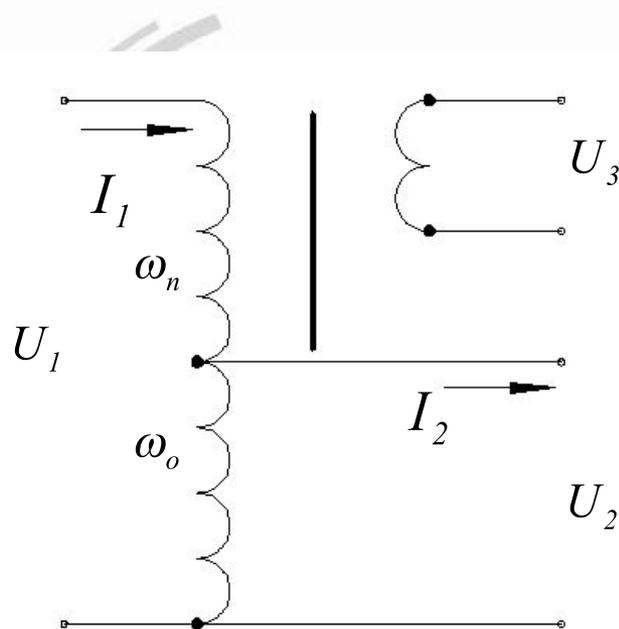
- Особенности автотрансформаторов

$$S_{min} = S_n k_v$$

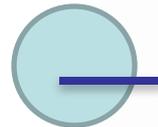
S_{min} – называется типовой мощностью или представляет собой мощность, передаваемую электромагнитным путем

Силовые трансформаторы

- Особенности автотрансформаторов



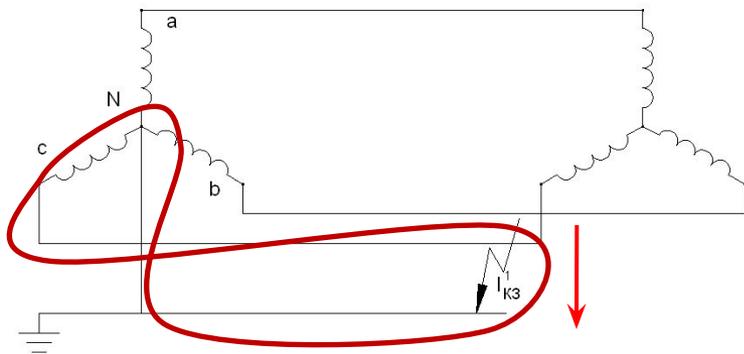
Автотрансформатор значительно **экономичнее трансформатора** за счет экономии активных материалов и изоляции (выброшена вторичная обмотка).



Недостатком автотрансформатора, ограничивающим область его применения, является то, что применять автотрансформаторы можно **ТОЛЬКО В ЦЕПЯХ С глухозаземленной нейтралью.**

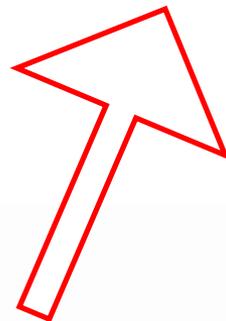
Режимы заземления нейтралей электроустановок

- Сети с глухозаземленной нейтралью



При замыкании одной фазы трехфазной сети на землю образуется короткозамкнутый контур через землю и нейтраль источника с малым сопротивлением. В результате чего возникает режим короткого замыкания с большим током.

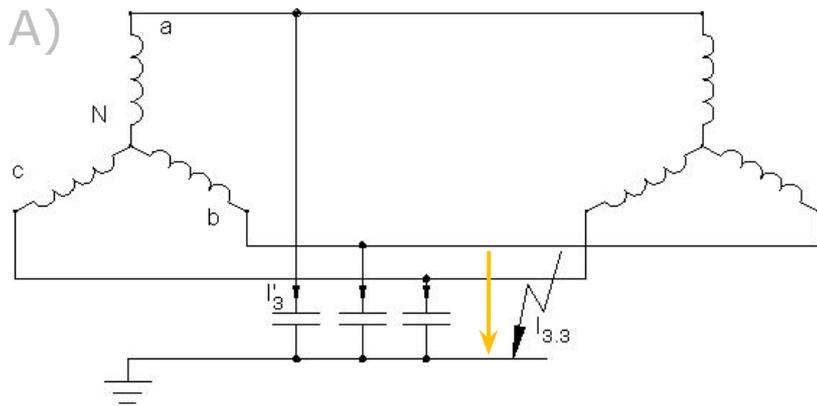
$I_{KЗ}$



В сетях с автотрансформаторами токи однофазных КЗ могут превышать токи трехфазных. В таких случаях применяют частичное разземление, а также токоограничивающие сопротивления.

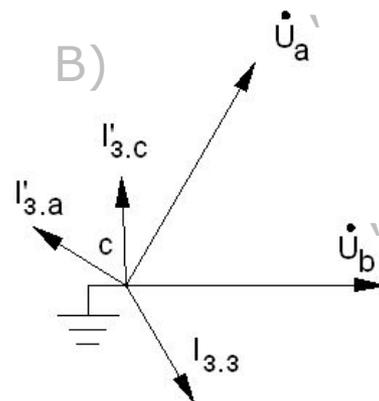
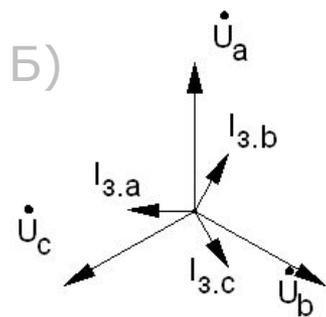
Режимы заземления нейтралей электроустановок

- Сети с изолированной нейтралью



В сетях с изолированной нейтралью замыкания не являются аварийным режимом, требующим отключения, и может существовать достаточно долго.

Фазная изоляция должна быть рассчитана на линейное напряжение. Только при напряжении до 35 кВ это не вызывает существенного удорожания сети.



$$U'_a = \sqrt{3} \cdot U_a$$

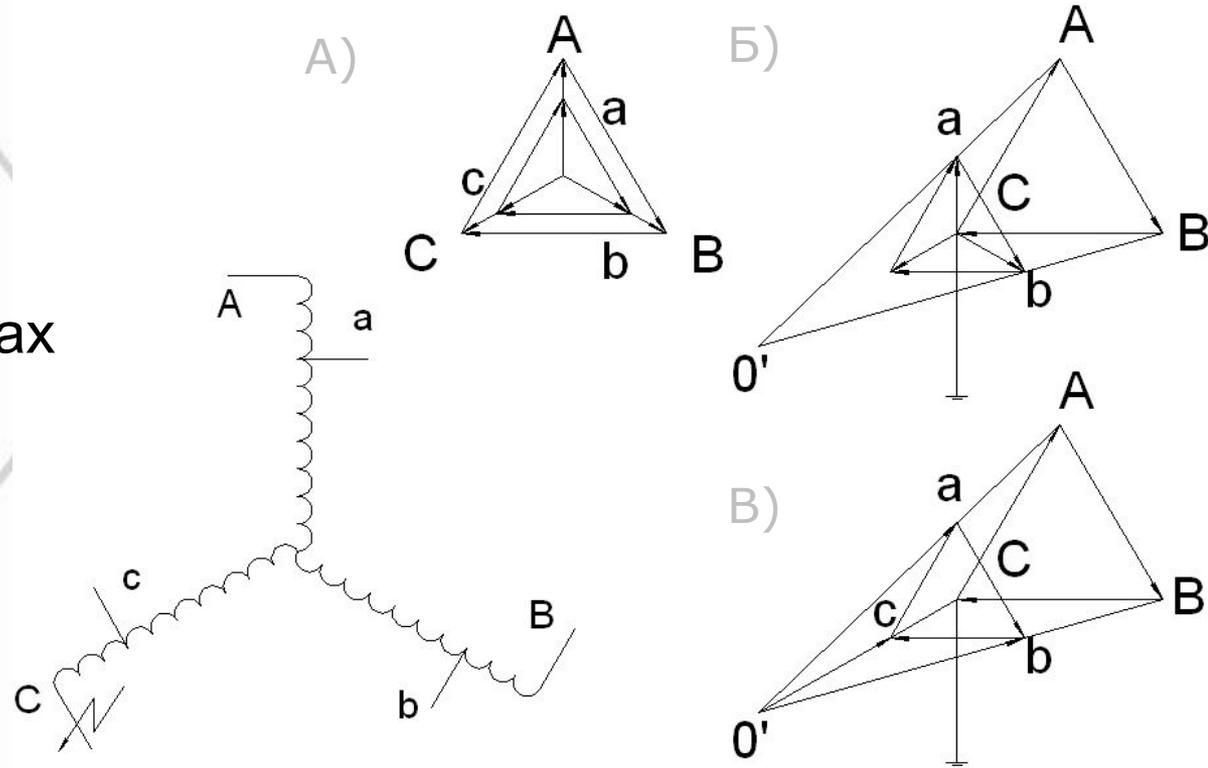
$$U'_b = \sqrt{3} \cdot U_b$$

$$U'_c = 0$$

Режимы заземления нейтралей электроустановок

- Автотрансформатор в сети с изолированной нейтралью

При замыкании на землю напряжение в неповрежденных фазах увеличивается в 3 – 8 раз.



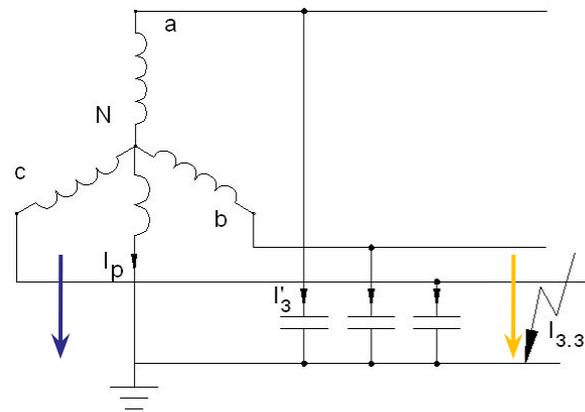
Режимы заземления нейтралей электроустановок

• Сети с резонансно-заземленными нейтральями

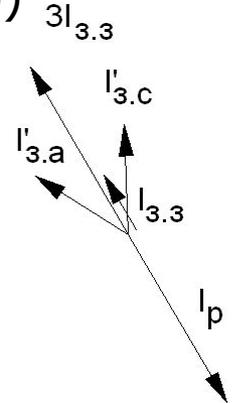
В сетях с изолированной нейтралью при недопустимых токах замыкания на землю в нейтраль источника включается заземляющий реактор.

1. Намного уменьшается ток замыкания на землю. Горение дуги становится неустойчивым и происходит ее гашение.
2. Малая вероятность перехода однофазного замыкания в многофазное.
3. Токи обратной последовательности малы, и их действие на генераторы несущественно.

А)



Б)



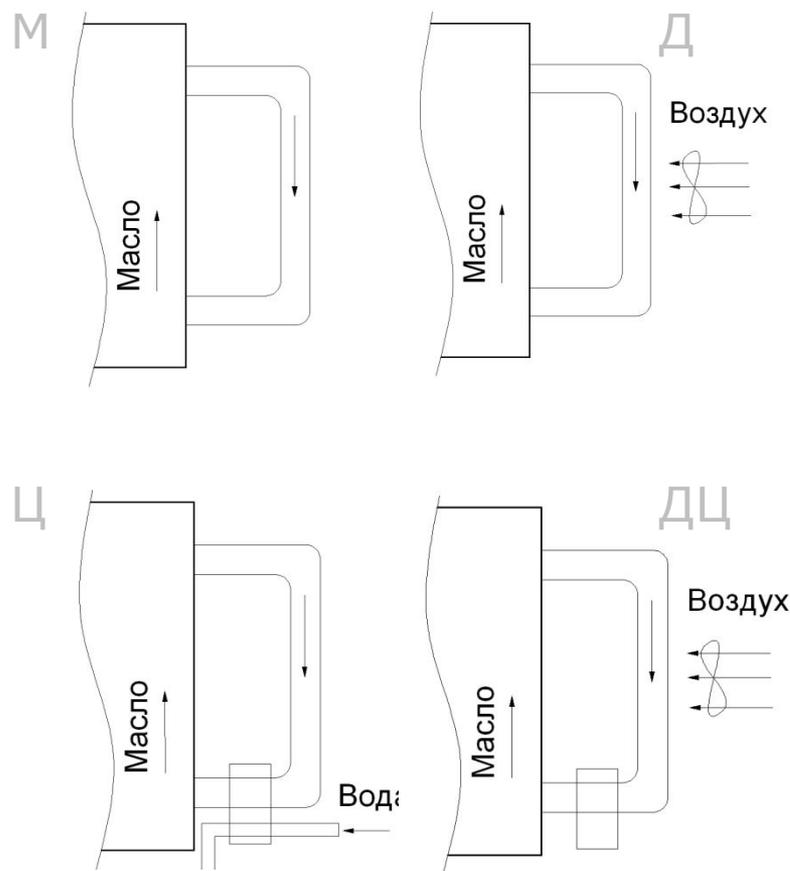
$$I'_{33} = 3I'_3 - I_p$$

$$I_p = 3I'_3$$

$$I'_L = -I'_C, \quad I'_L + I'_C = 0$$

Системы охлаждения силовых трансформаторов

- **С** – естественное воздушное
- **М** – естественная циркуляция масла
- **Д** – принудительный обдув и естественная циркуляция масла
- **Ц** – естественный обдув и принудительная циркуляция масла (масляно-водяное)
- **ДЦ** – принудительный обдув и принудительная циркуляция масла
- **МВ** – масляно-водяное с естественной циркуляцией масла



Регулирование напряжения силовых трансформаторов

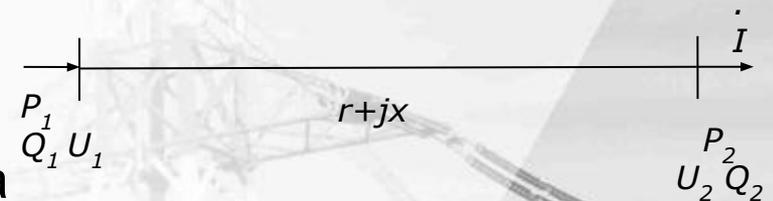
- Способы регулирования напряжения:

- Активное регулирование напряжения (воздействие на величину потери напряжения за счет изменения баланса мощности)

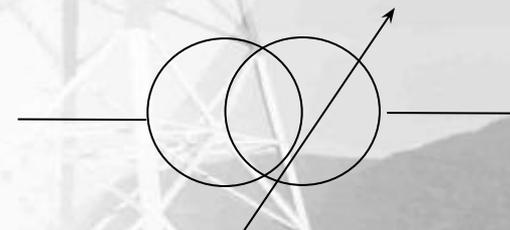
- генераторы
- синхронные компенсаторы
- СД
- БСК и устройства на их основе

- Пассивное регулирование

- Регулирование напряжения в силовом трансформаторе
- Применение вольтодобавочных трансформаторов



$$\Delta U = \frac{r\sqrt{3}U_2 I \cos \phi + x\sqrt{3}U_2 I \sin \phi}{U_2} = \frac{P_2 r + Q_2 x}{U_2}$$

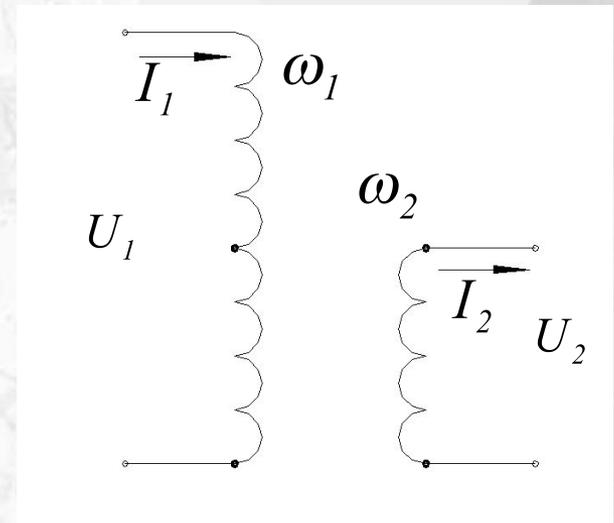


Регулирование напряжения силовых трансформаторов

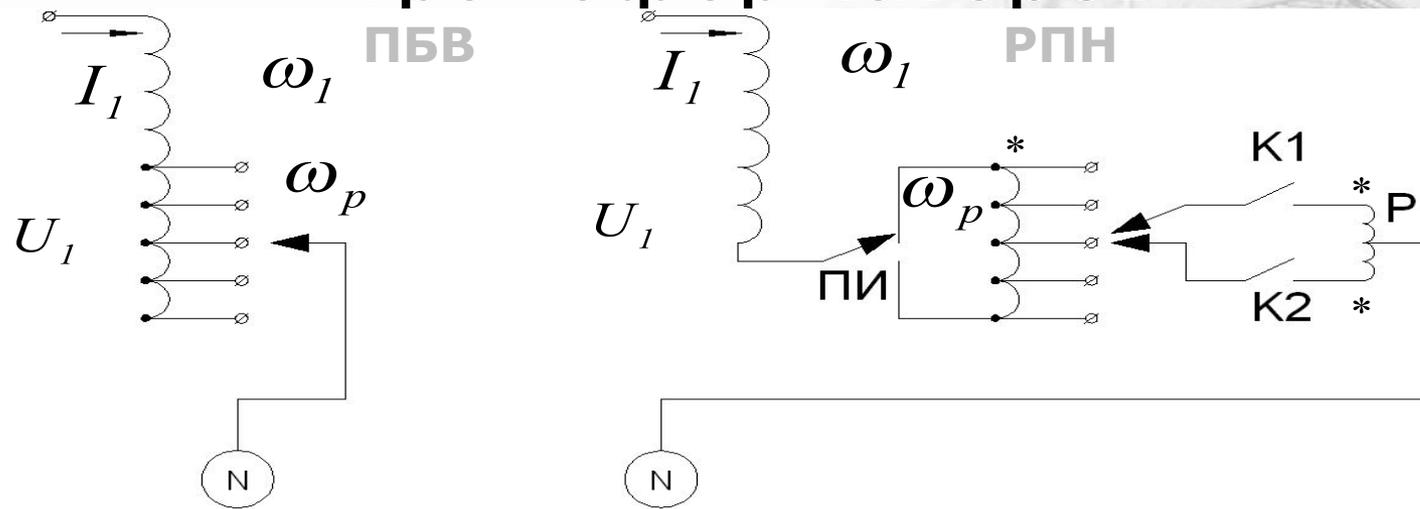
- Регулирование напряжения в силовом трансформаторе осуществляется за счет изменения соотношения числа витков обмоток

$$\frac{U_1}{\omega_1} = \frac{U_2}{\omega_2} = u$$

- Виды регуляторов напряжения
 - **ПБВ** (переключение без возбуждения) – изменение числа витков происходит только при отключенном трансформаторе; используется для сезонного регулирования.
 - **РПН** (регулирование под нагрузкой) – регулирование осуществляется в нагрузочных режимах.



Регулирование напряжения силовых трансформаторов



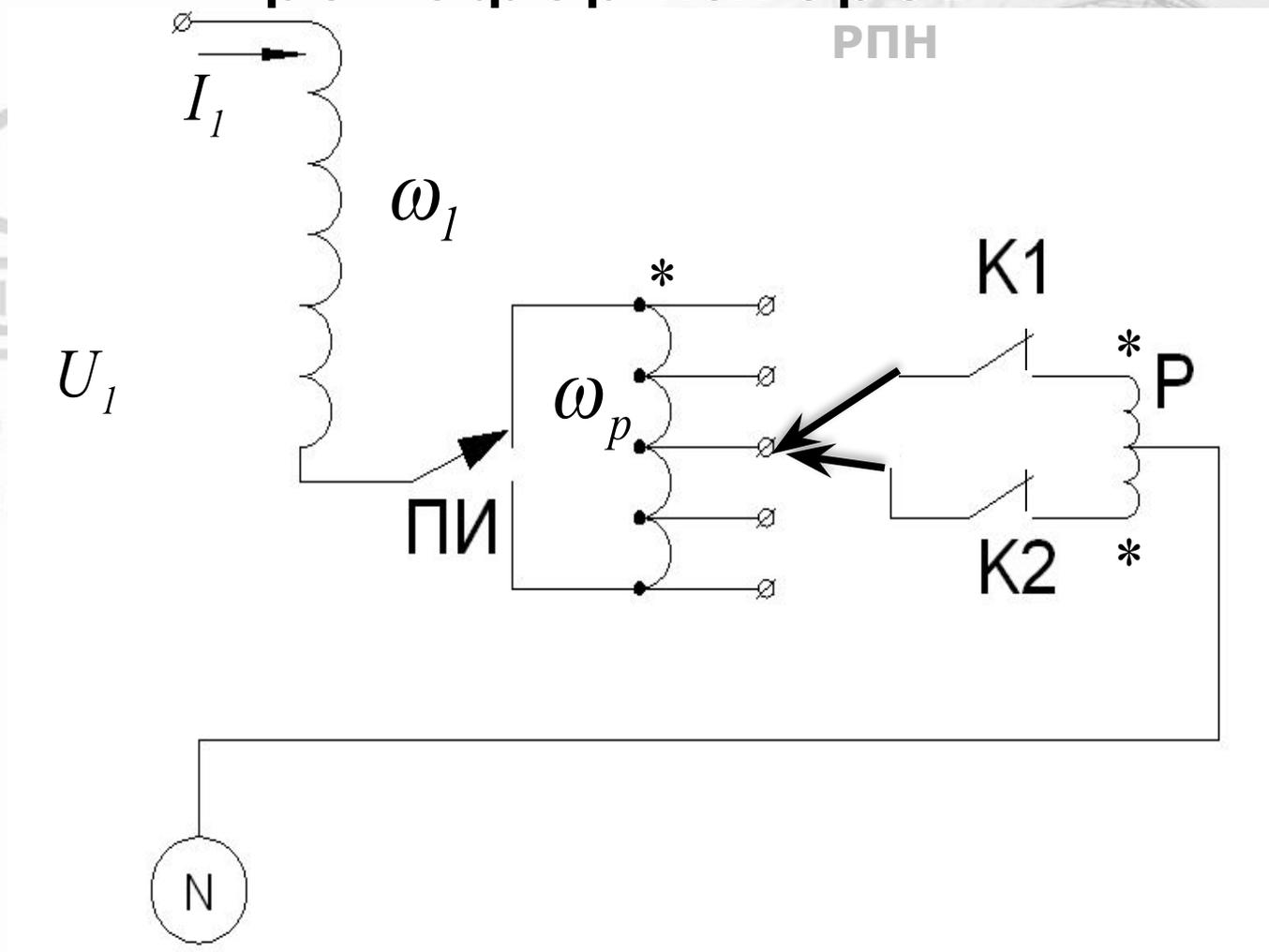
Характеристики регулятора напряжения

- Диапазон регулирования – величина изменения напряжения в процентах от номинального, которая достигается на регуляторе.
- Степень регулирования – минимальная величина регулировочного диапазона.

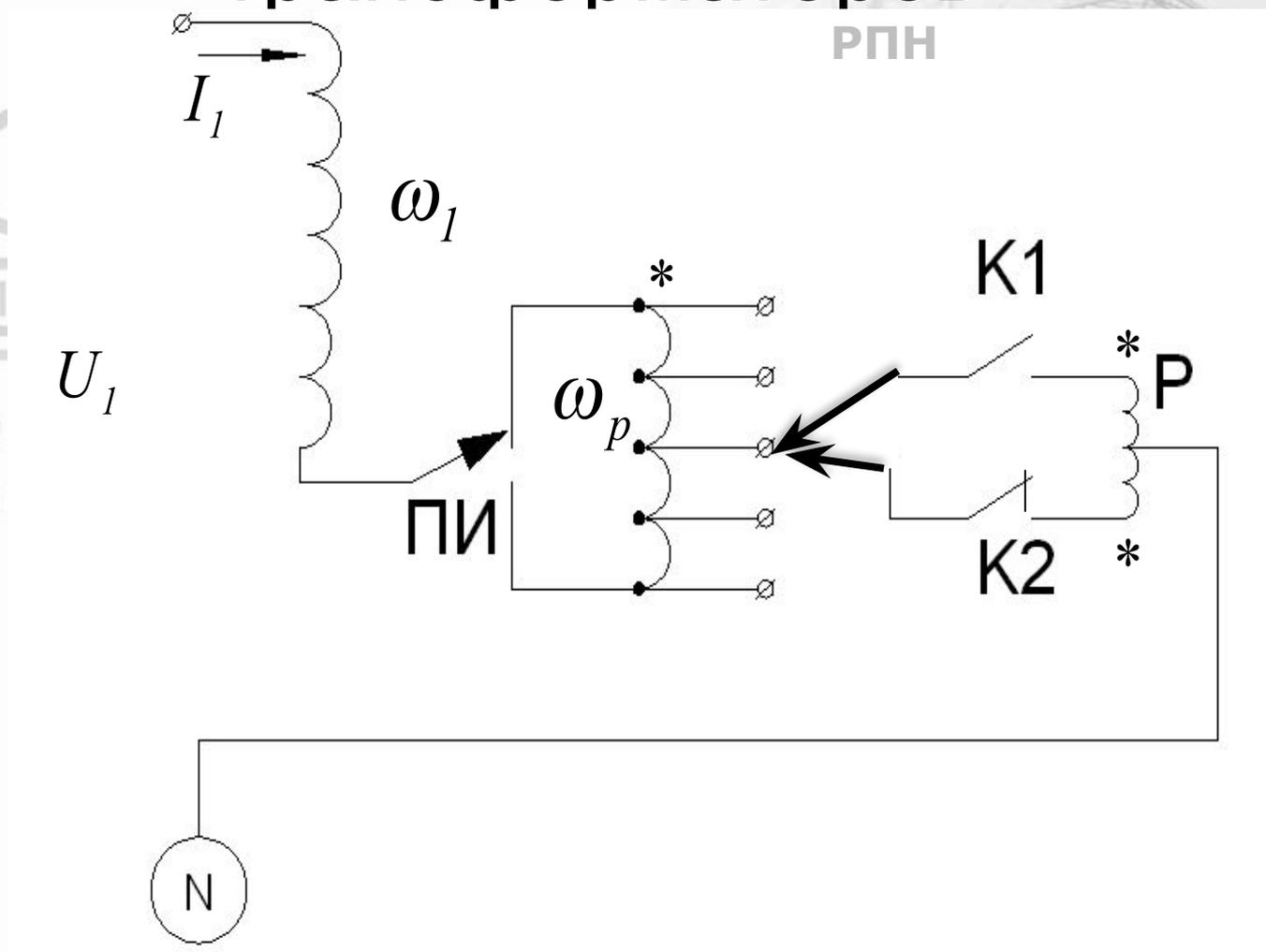
Ступени регулирования ПБВ: $\pm 2,5$; $\pm 5\%$

Диапазон регулирования РПН до 20 %

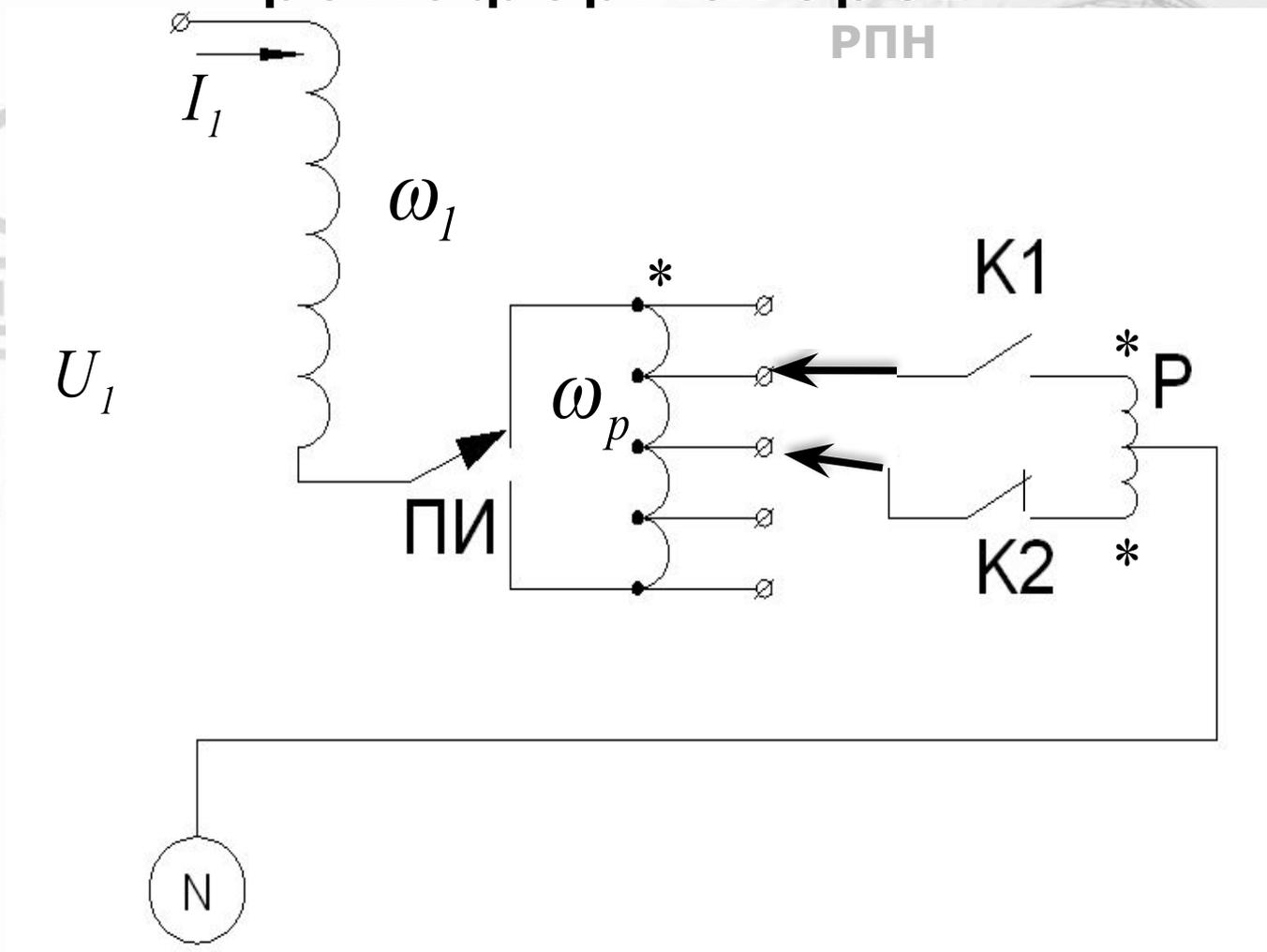
Регулирование напряжения силовых трансформаторов



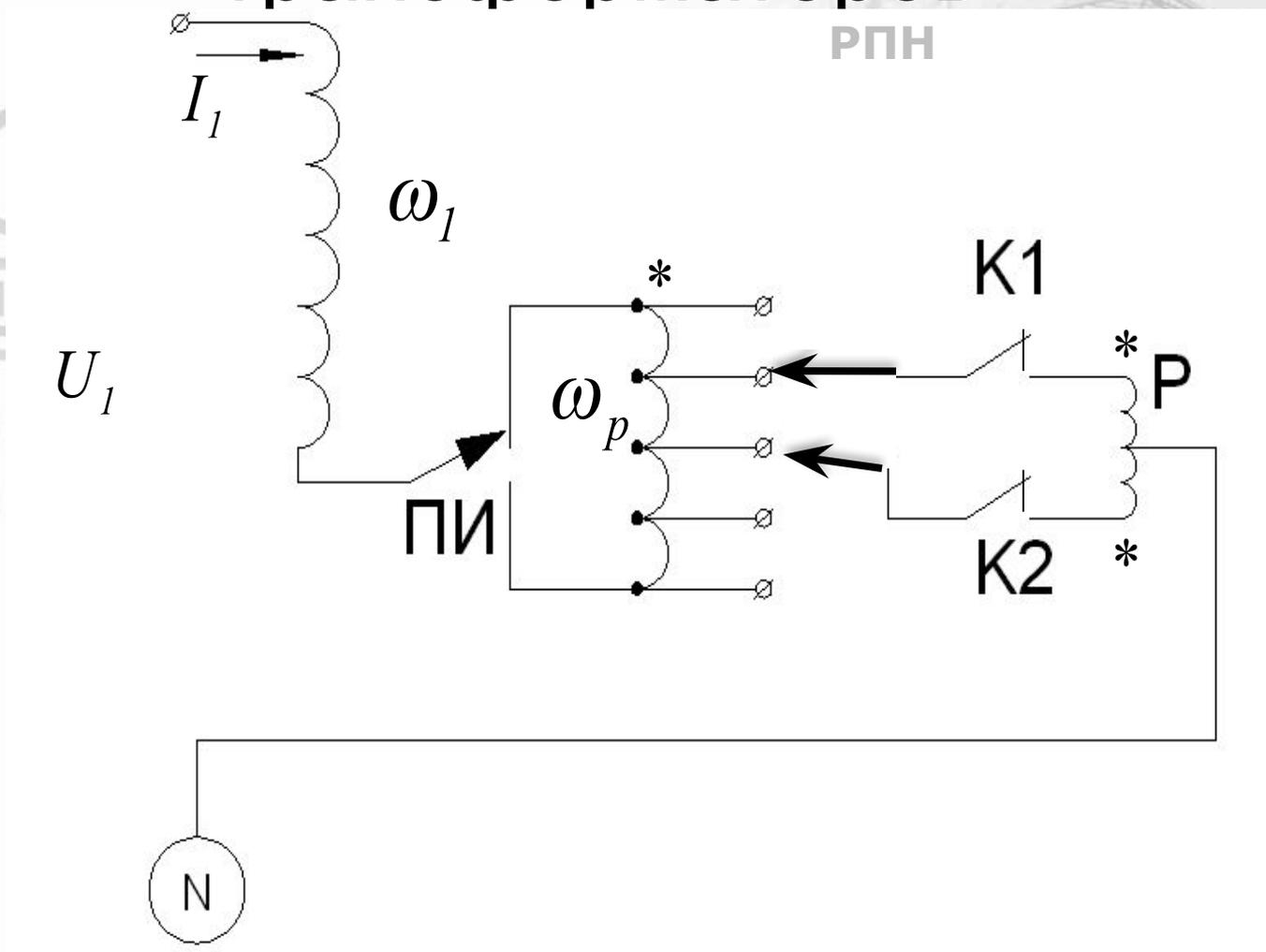
Регулирование напряжения силовых трансформаторов



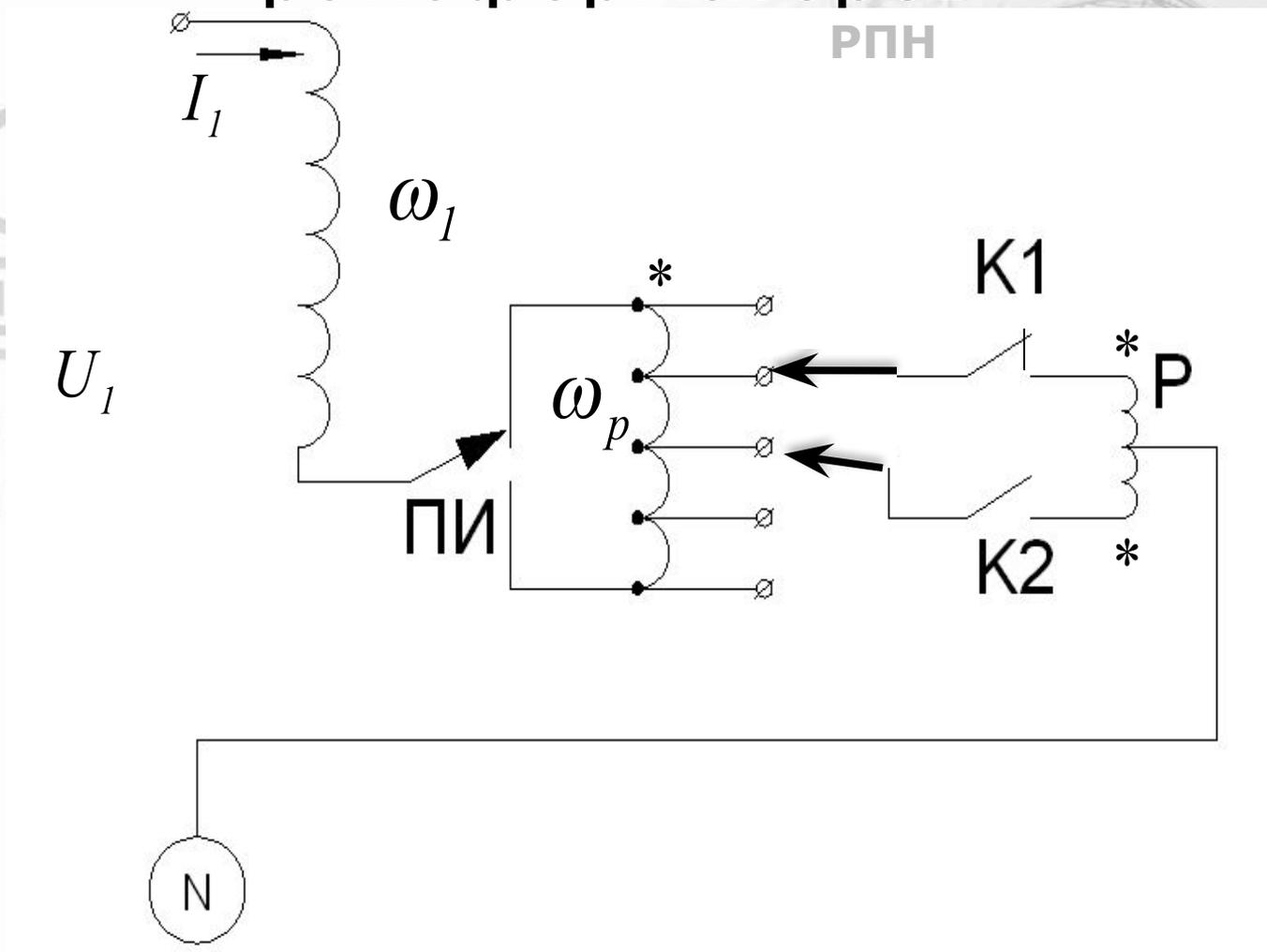
Регулирование напряжения силовых трансформаторов



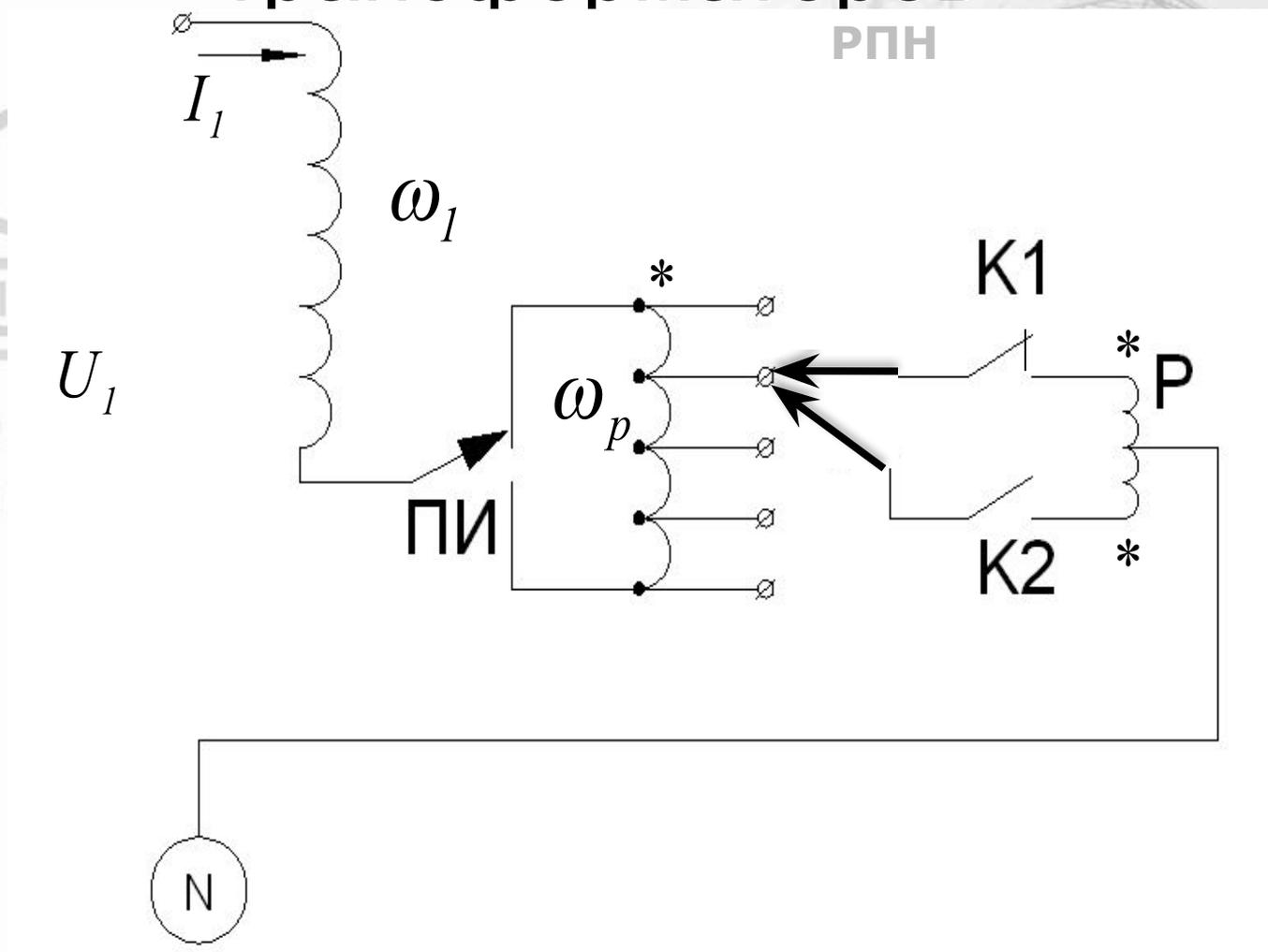
Регулирование напряжения силовых трансформаторов



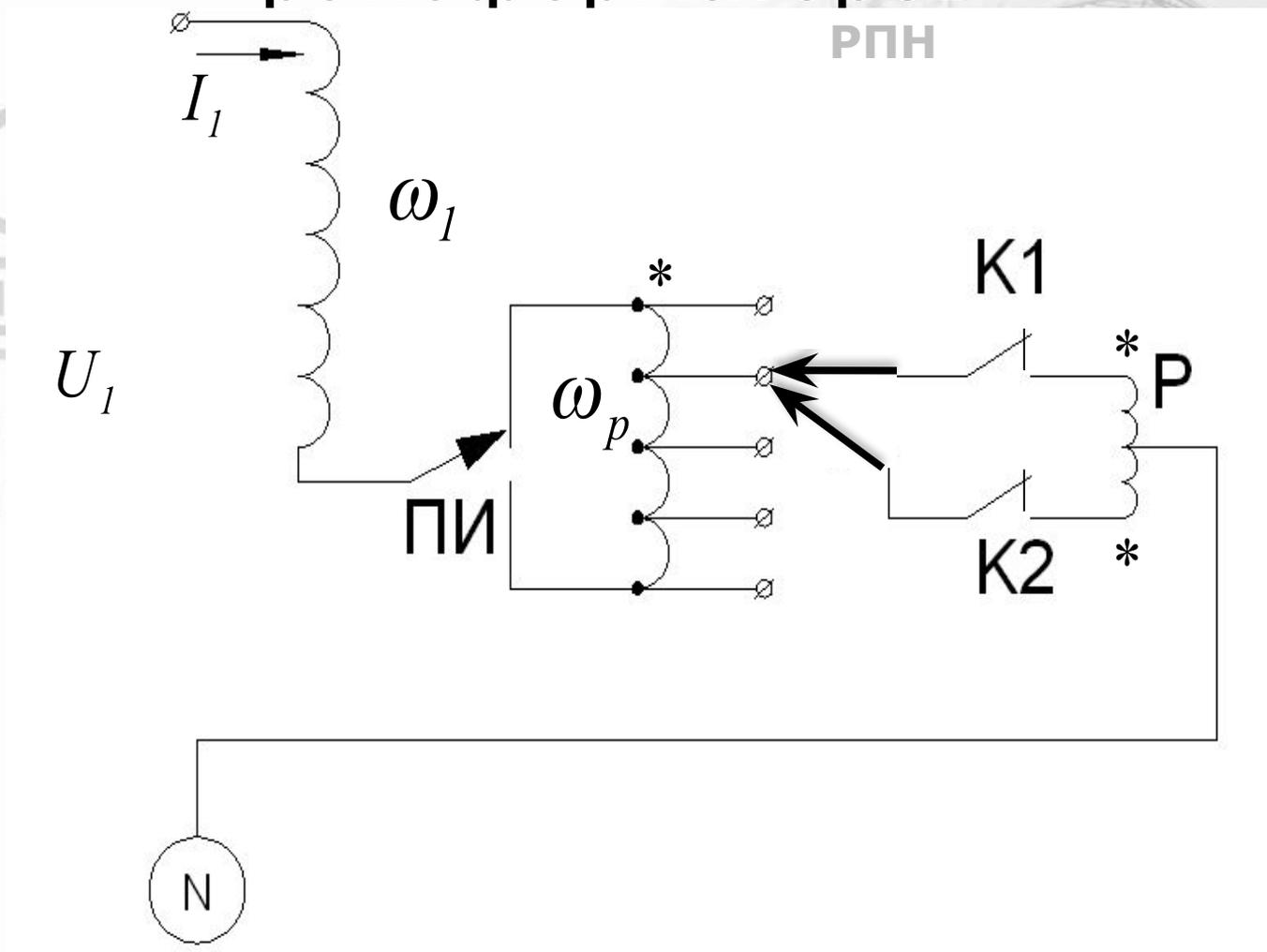
Регулирование напряжения силовых трансформаторов



Регулирование напряжения силовых трансформаторов

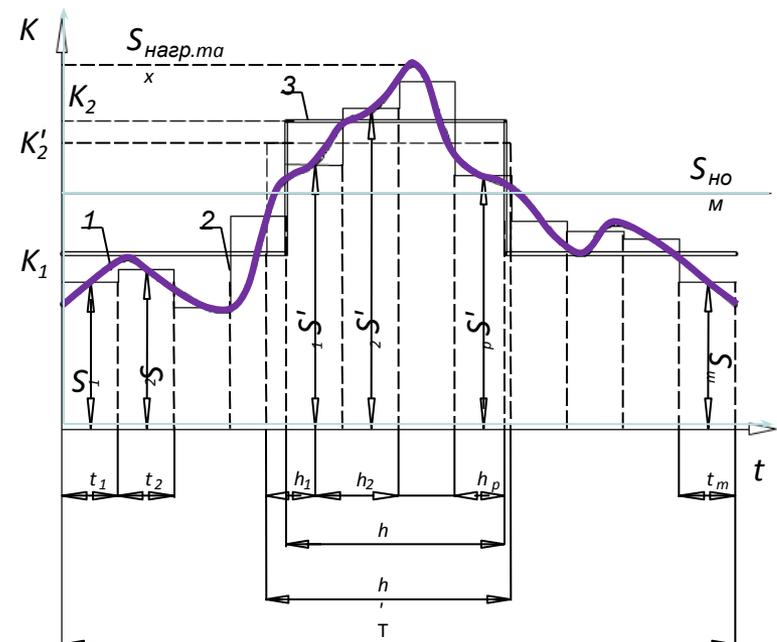


Регулирование напряжения силовых трансформаторов



Нагрузочная способность силового трансформатора

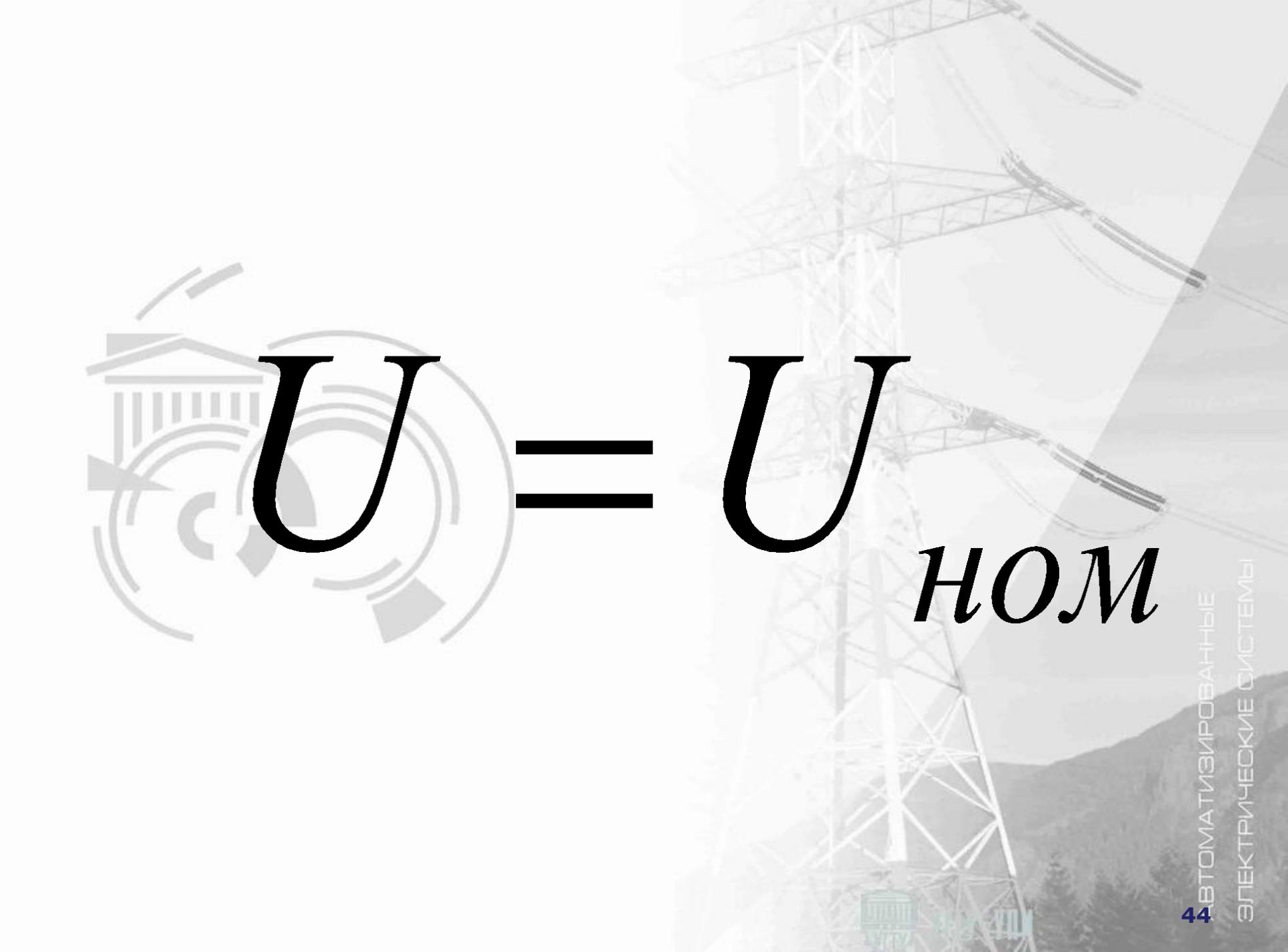
- Допустимость загрузки силового трансформатора определяется сроком службы изоляции.
- Нормативный срок службы – 30 лет (изоляция) при температуре н.н.т. равной **98°C**, температуре окружающей среды **20°C** и номинальной загрузке.



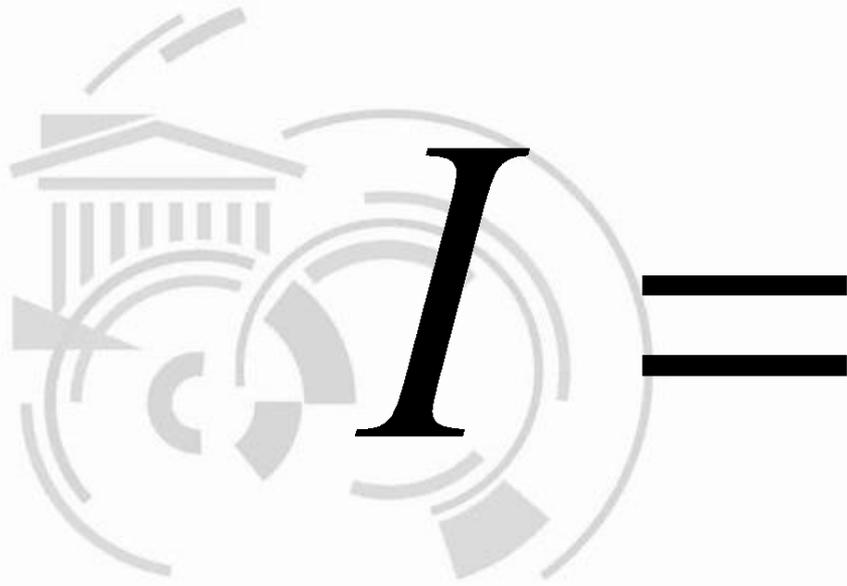
Преобразование графика нагрузки:

1 – исходный; 2 – эквивалентный многоступенчатый;

3 – эквивалентный двухступенчатый



$U = U$
НОМ



I = ***I***
НОМ

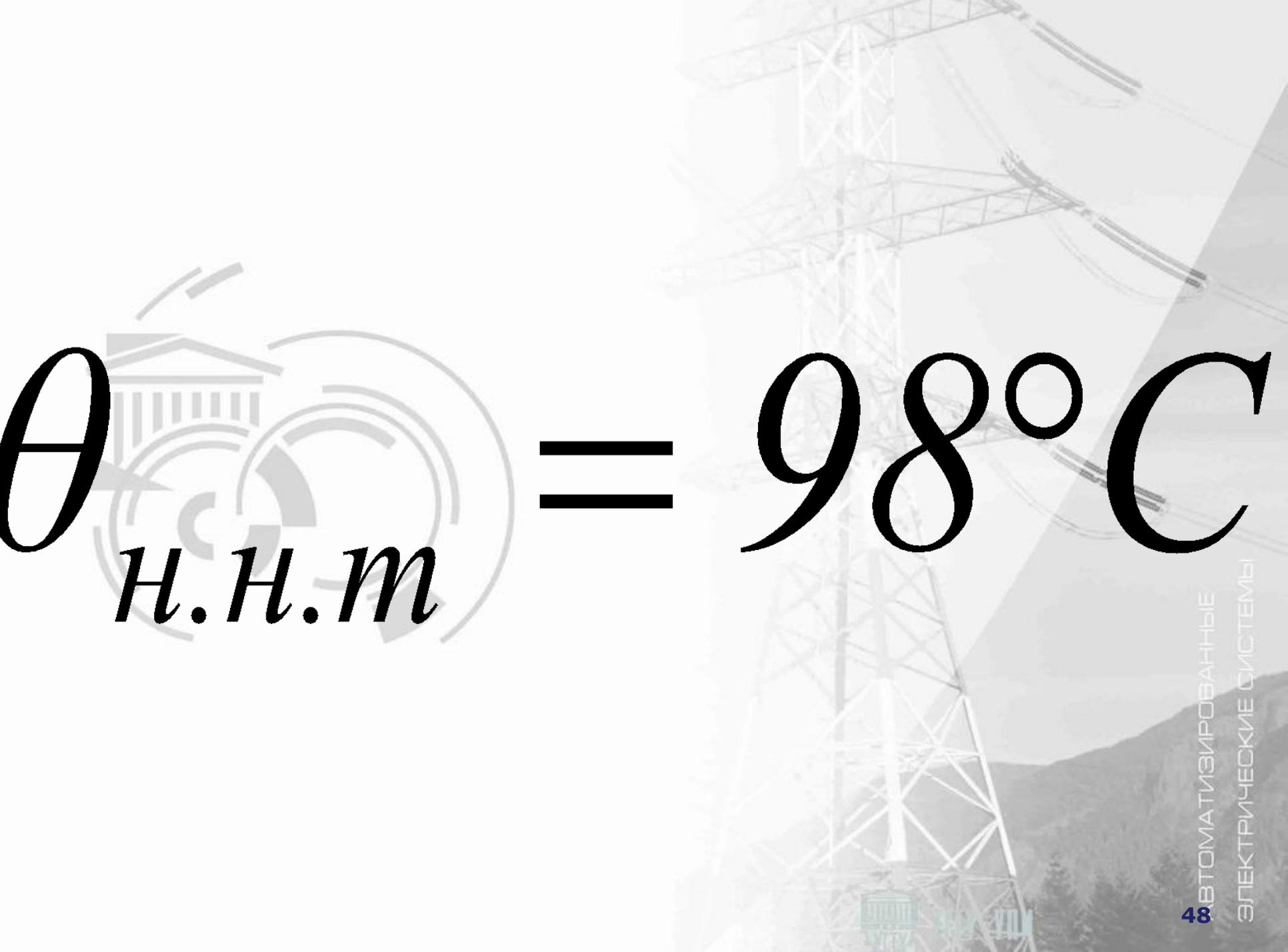


$\theta_{\text{охл}}$

$=$

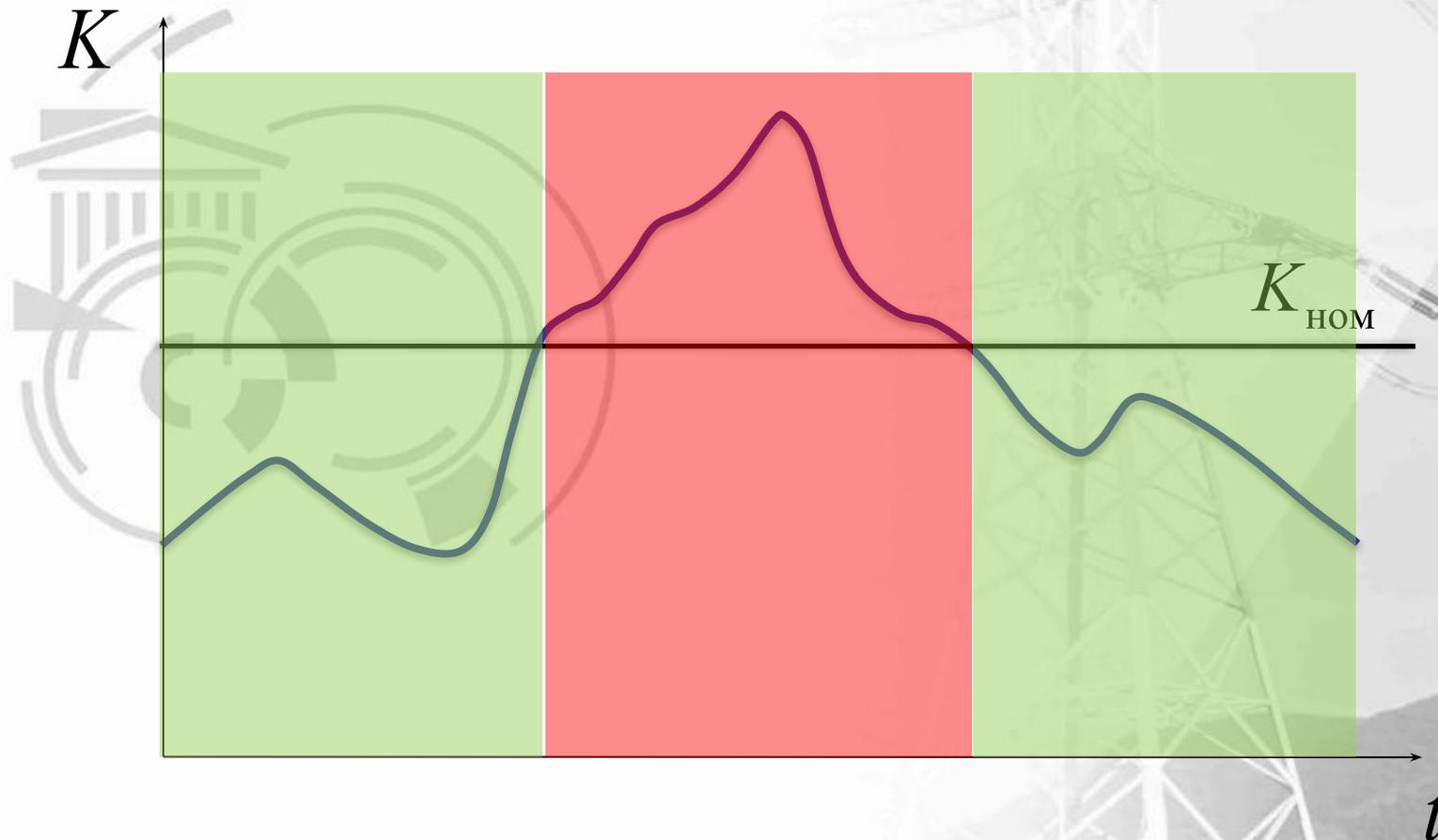
$\theta_{\text{ном}}$


$$\theta_{НОМ} = 20^{\circ}\text{C}$$



$\theta_{\text{н.н.т}}$ = 98°C

Нагрузочная способность силового трансформатора



Нагрузочная способность силового трансформатора

Температура н.н.т.:

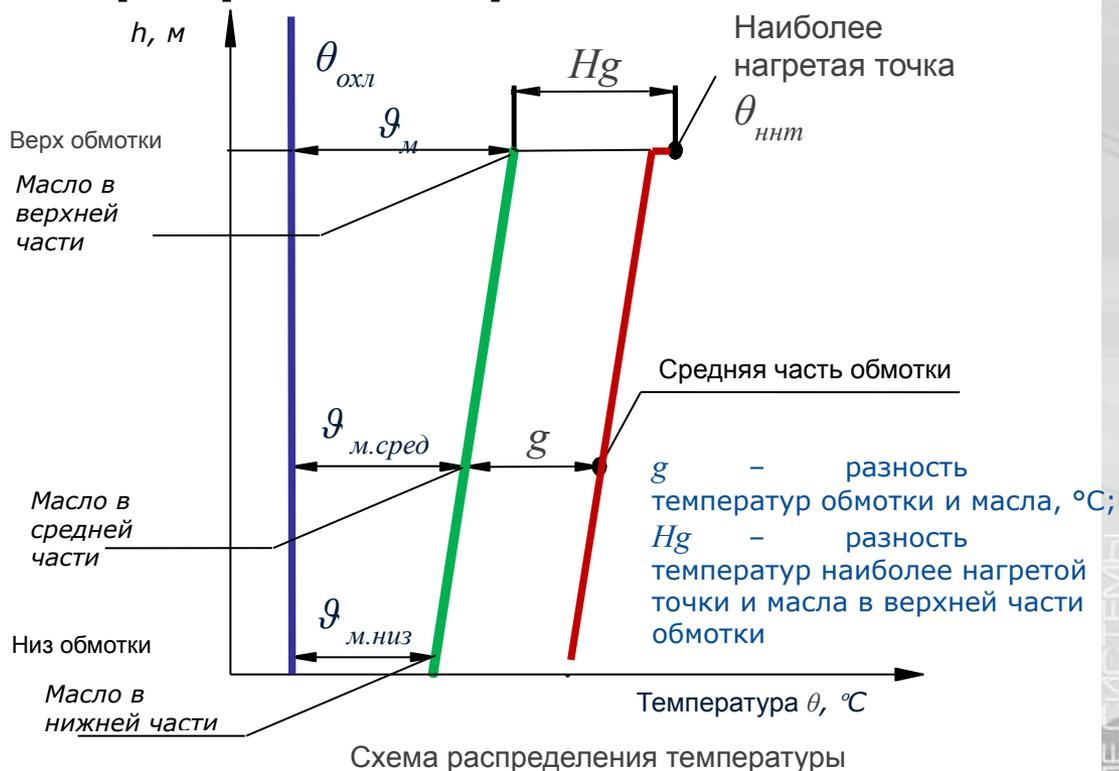
$$\theta_{н.н.т.} = \theta_{охл} + \vartheta_{м} + \vartheta_{н.н.т.м.}$$

Относительный износ изоляции:

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^t V dt$$

Скорость износа:

$$V = \frac{\text{скорость износа при } \theta_{н.н.т.}}{\text{скорость износа при } 98^{\circ} \text{C}} = 2^{(\theta_{н.н.т.} - 98) / 6}$$



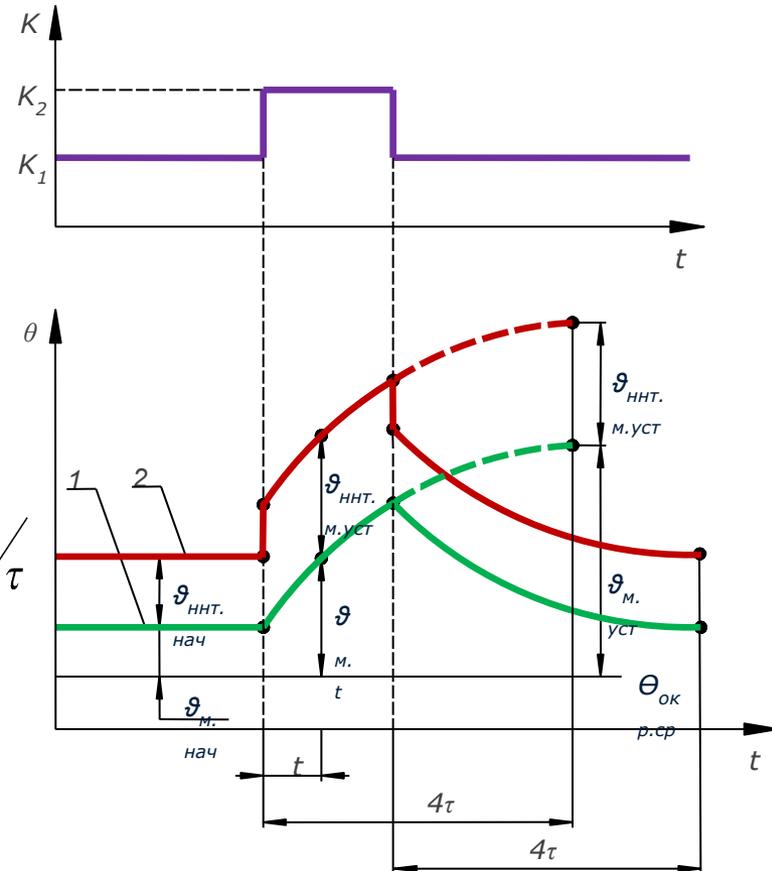
Нагрузочная способность силового трансформатора

$$\vartheta_{м.уст} = \vartheta_{м.ном} \cdot \left[\frac{1 + dK^2}{1 + d} \right]^X$$

$$\vartheta_{н.н.т.м.уст} = \vartheta_{н.н.т.м.ном} \cdot K^Y$$

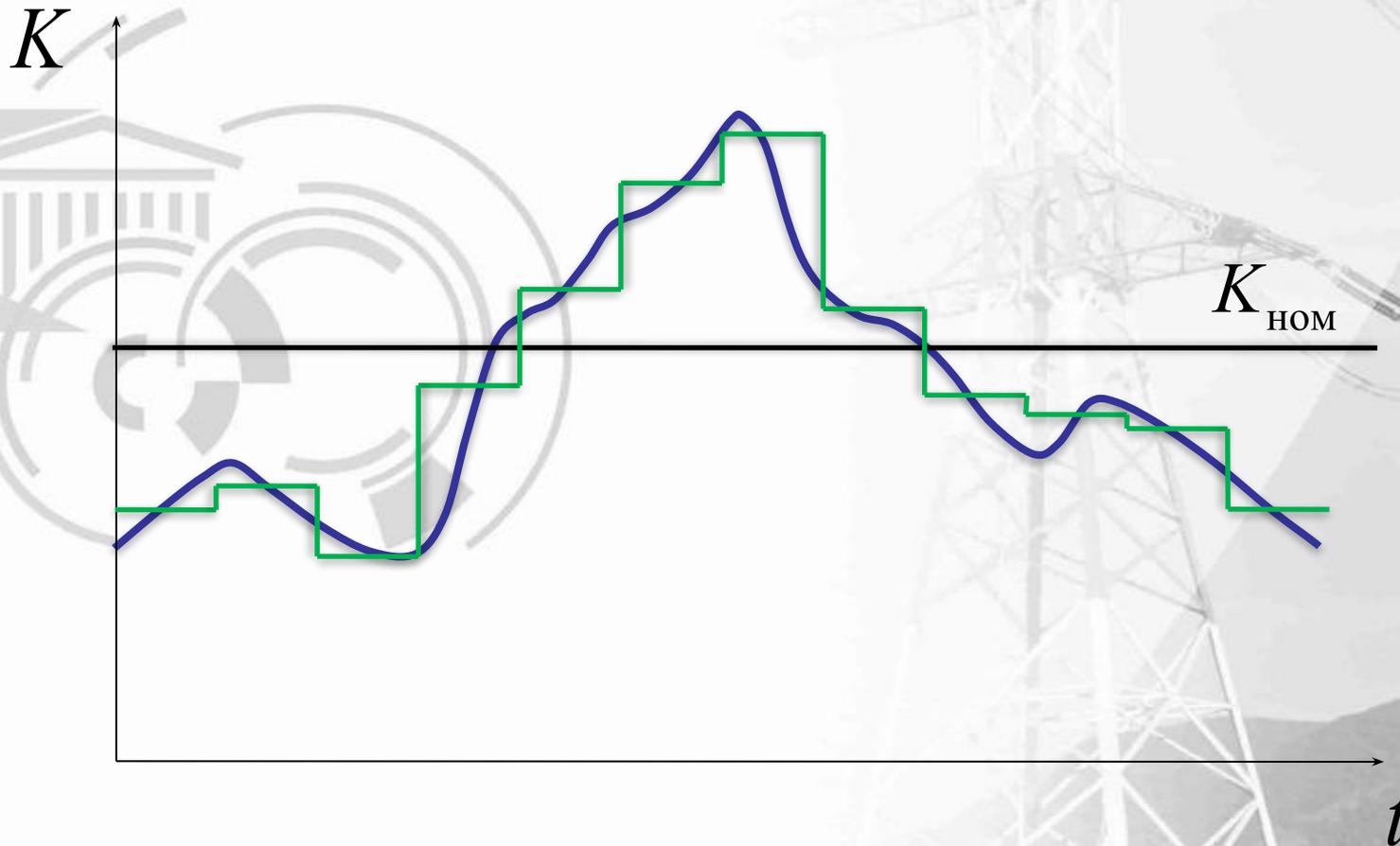
$$\vartheta_{м.т} = \vartheta_{м.уст} + (\vartheta_{м.нач} - \vartheta_{м.уст}) \cdot e^{-t/\tau}$$

$$\theta_{н.н.т.} = \theta_{ОХЛ} + \vartheta_{м} + \vartheta_{н.н.т.м.}$$

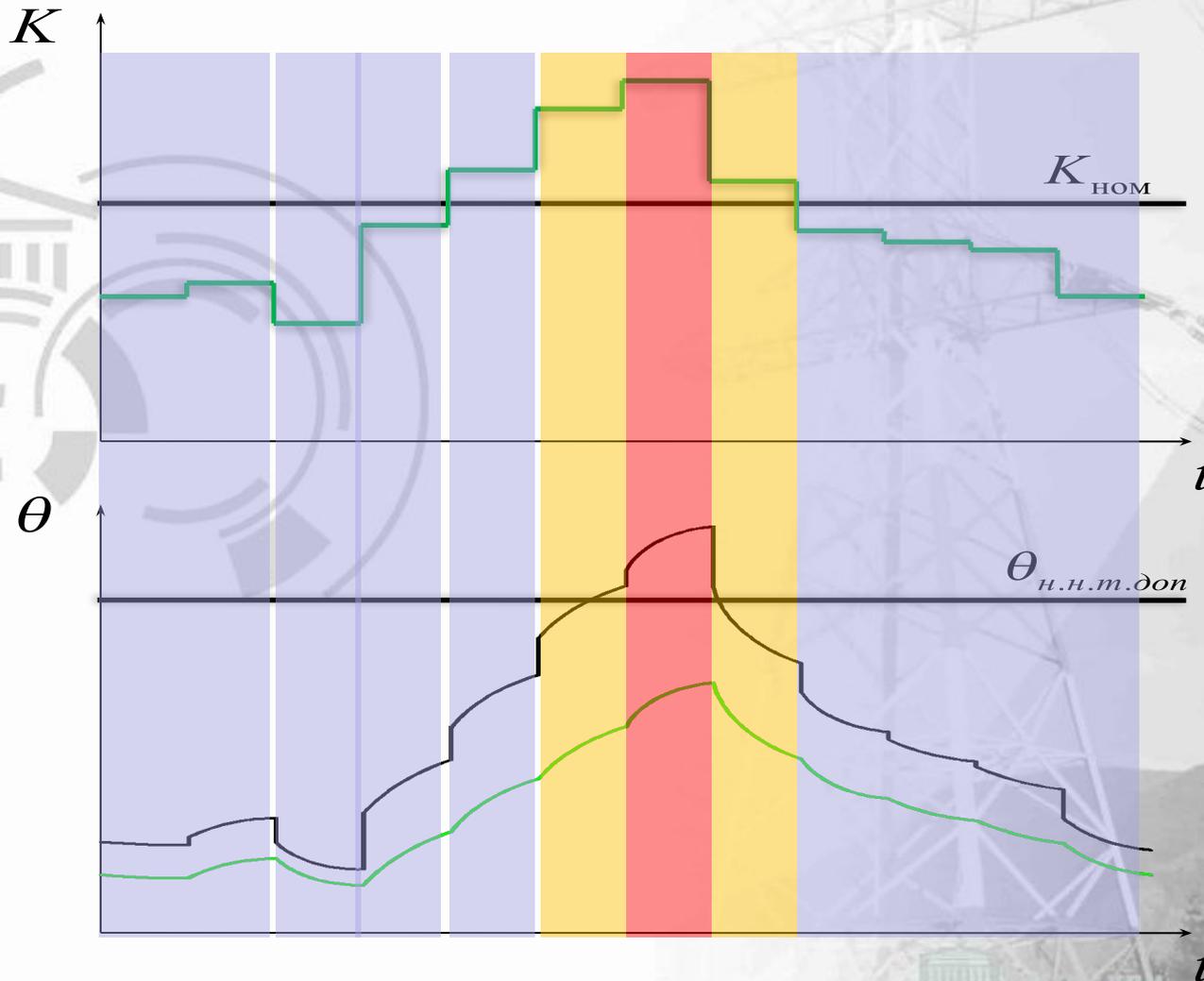


Изменение температуры
 1 – температура масла в верхних слоях;
 2 – температура наиболее нагретой точки обмотки

Нагрузочная способность силового трансформатора



Нагрузочная способность силового трансформатора

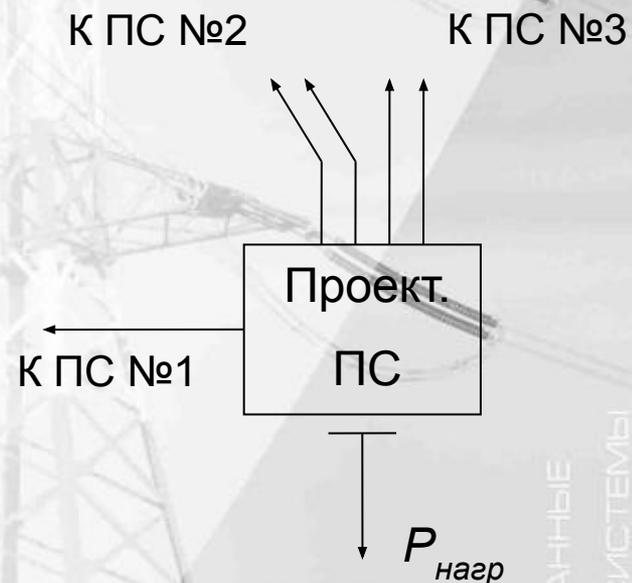


Виды перегрузок силовых трансформаторов

Тип нагрузки	Трансформаторы		
	Распределительные	Средней мощности	Большой мощности
Режим систематических нагрузок			
Нагрузка, отн. ед.	1,5	1,5	1,3
Температура наиболее нагретой точки и металлических частей, соприкасающихся с изоляционным материалом, °C	140	140	120
Температура масла в верхних слоях, °C	105	105	105
Режим продолжительных аварийных перегрузок			
Нагрузка, отн. ед.	1,8	1,5	1,3
Температура наиболее нагретой точки и металлических частей, соприкасающихся с изоляционным материалом, °C	150	140	130
Температура масла в верхних слоях, °C	115	115	115
Режим кратковременных аварийных перегрузок			
Нагрузка, отн. ед.	2,0	1,8	1,5
Температура наиболее нагретой точки и металлических частей, соприкасающихся с изоляционным материалом, °C	Доп. условия	160	160
Температура масла в верхних слоях, °C	Доп. условия	115	115

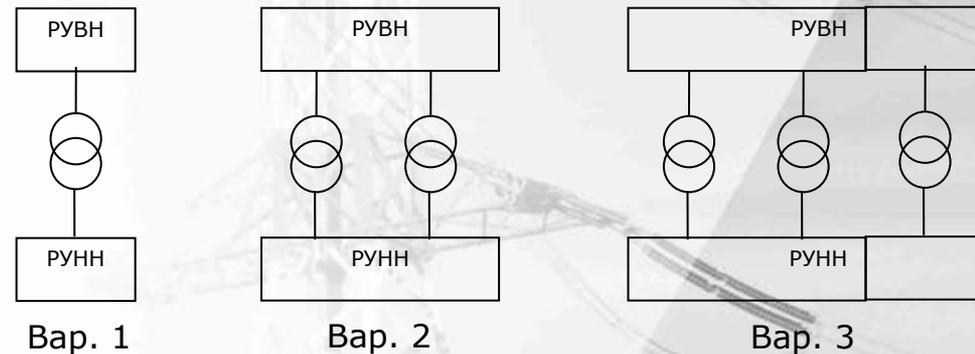
Выбор числа и мощности трансформаторов

- сведения о прилегающем участке сети энергетической системы (ЭЭС) и ее режимах работы
 - число РУ ПС и их классы напряжения;
 - схема подключения ПС к ЭЭС и характеристика присоединений;
 - структура оперативного и ремонтного обслуживания предприятия электрических сетей.
- сведения об электропотреблении:
 - график нагрузки (летний и зимний); абсолютный максимум;
 - характер потребителей и деление по категориям надежности, наличие возможности их резервирования по потребительским сетям;
- сведения о климатических условиях в районе сооружения ПС:
- данные об эквивалентных температурах окружающей среды



Выбор числа и мощности трансформаторов

- На ПС рекомендуется устанавливать два трансформатора.
- Установка одного трансформатора не рекомендуется по условиям надежности.
- Установка более двух, как правило, нецелесообразна.



Варианты трансформаторных подстанций

$$S_{\text{ном.т}} \approx \frac{S_{\text{нагр.тах}} (1 - \varepsilon_{\text{откл}})}{(n_{\text{т}} - 1) \cdot 1,4},$$

Рекомендуемая литература:

- 1. Электрическая часть станций и подстанций. Учебник для вузов/ Под ред. А.А.Васильева. - М.: Энергия, 1990. - 576с.
- 2. Электрическая часть электростанций/ Под ред. С.В.Усова. - Л.: Энергия, 1987. - 616с.
- 3. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. - М.: Энергия, 1987. - 623с.
- 4. Справочник по проектированию подстанций 35-500 кВ/ Под ред. С.С.Рокотяна и Я.С.Самойлова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 266с.
- 5. Электротехнический справочник/ Под ред. В.Г. Герасимова, П.Г.Грудинского, Л.А.Жукова и др. , 7-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1985-1988. Т1, 1985 -500с; Т2, 1985 -500с; Т3, 1988 -500с.



Спасибо за внимание !