

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

1. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ
2. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК МЕЖДУ // РАБОТАЮЩИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Климова Галина Николаевна

к.т.н., доцент кафедры ЭПП ТПУ



1. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

На примере продукции Минского
трансформаторного завода им. Козлова

<http://www.metz.by>



Трансформаторы серии ТМГСУ - масляные герметичные с симметрирующим устройством

Преимущества:

1. Ликвидировано явление перегрева потоками нулевой последовательности при неравномерной нагрузке фаз и при ее суммарной мощности равной или ниже номинальной
2. Снижено разрушающее воздействие на обмотки при токах однофазного короткого замыкания
3. Улучшенная синусоидальная форма кривой напряжения
4. Меньшие потери электроэнергии в самих трансформаторах и в электрической сети

Недостаток, который быстро проходит:

1. Цена



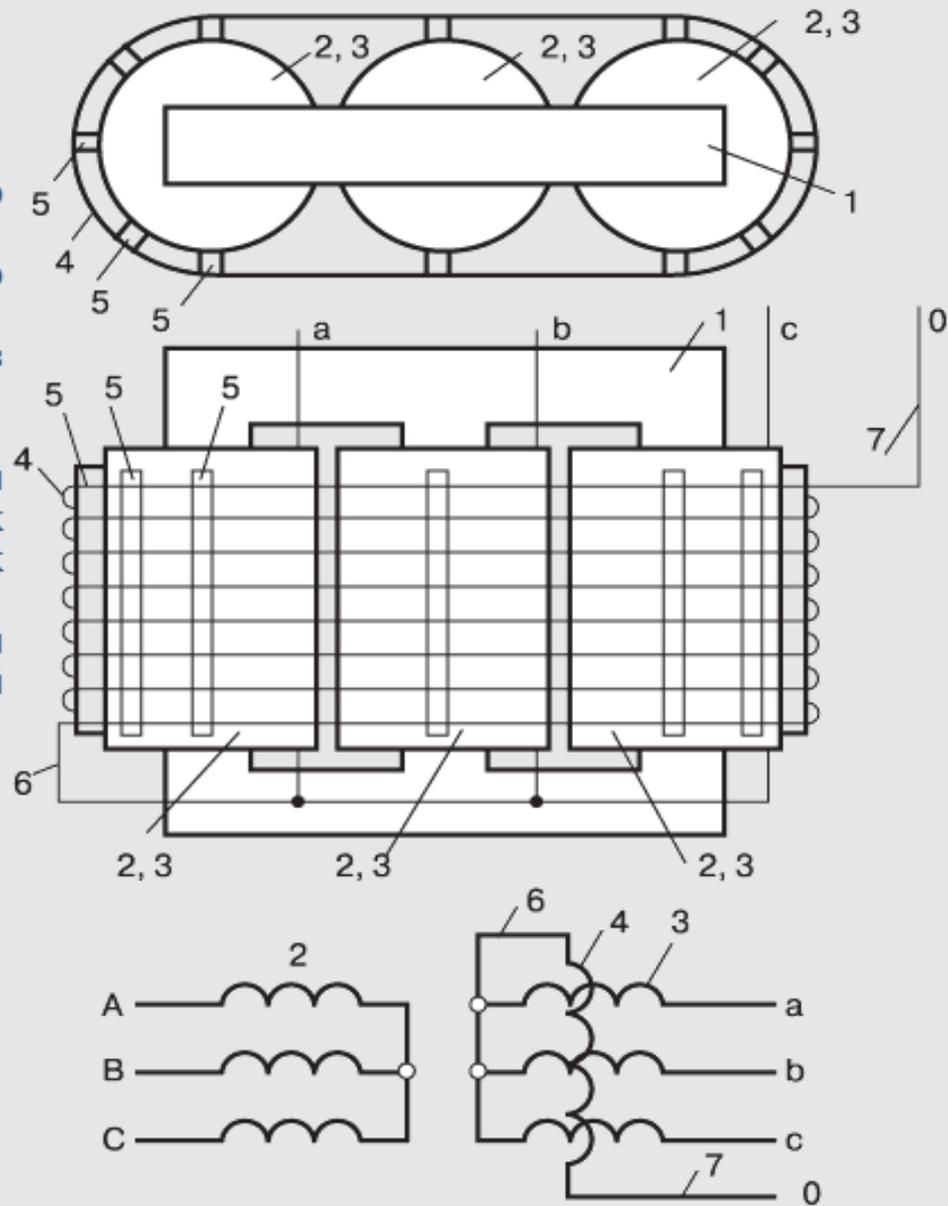
Трансформатор плюс СУ

- Симметрирующее устройство (СУ) встраивается в трансформатор со схемой Y/Y_n
- Представляет собой отдельную обмотку, уложенную в виде бандажа поверх обмоток высокого напряжения трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_n (рис. 1). Обмотка симметрирующего устройства рассчитана на длительное протекание номинального тока трансформатора, т.е. на полную номинальную однофазную нагрузку



Схемы включения основных и дополнительной обмоток трансформатора

1. Трехстержневой магнитопровод трехфазного трансформатора.
2. Обмотки высокого напряжения.
3. Обмотки низкого напряжения.
4. Обмотка из компенсационных витков.
5. Дистанционные клинья.
6. Конец компенсационной обмотки, подключаемой к нейтрали обмоток низкого напряжения.
7. Конец компенсационной обмотки, который выводится наружу.



Принцип действия

Обмотка симметрирующего устройства включена в рассечку нулевого провода трансформатора Y/Y_n из расчета на то, что при несимметричной нагрузке и появлении тока в нулевом проводе создаваемые в магнитопроводе потоки нулевой последовательности в рабочих обмотках F_{op} трансформатора Y/Y_n полностью компенсируются противоположно направленными потоками нулевой последовательности $F_{ок}$ от симметрирующего устройства. Тем самым в конечном счете предотвращается перекос фазных напряжений.



2. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

определяется числом одновременно включенных трансформаторов, обеспечивающих минимум потерь в них



Понятие

Приведенные потери мощности (энергии) в трансформаторах
потери активной мощности, возникающие в системе ЭСПП по всей
цепочке питания от генераторов ЭС до рассматриваемых
трансформаторов из-за потребления ими реактивной мощности

$$\Delta P'_{\text{тр}} = \Delta P'_{\text{ХХ}} + k_{\text{загр}}^2 \cdot \Delta P'_{\text{КЗ}}$$

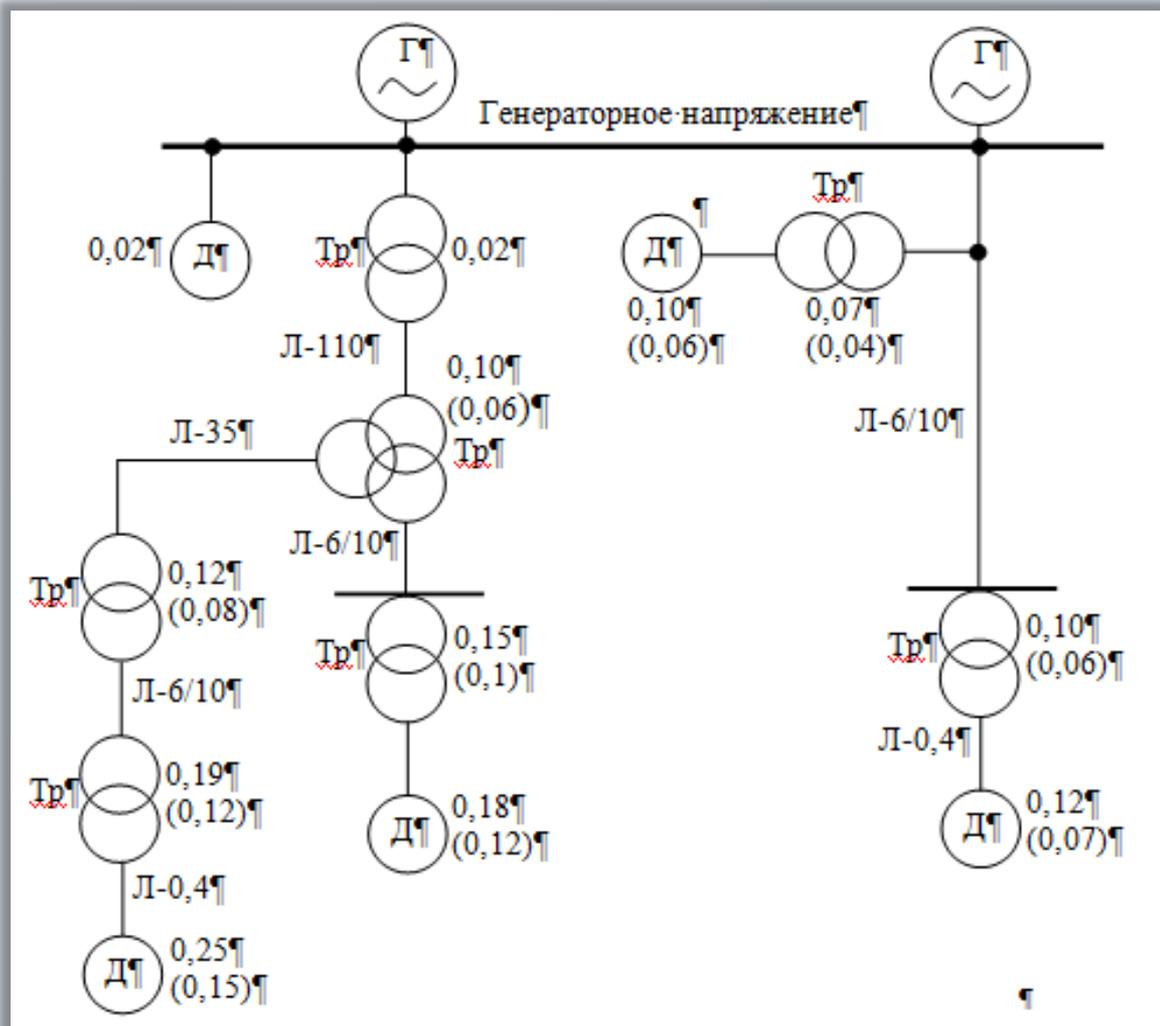
где:

$$\Delta P'_{\text{ХХ}} = \Delta P_{\text{ХХ}} + k_{\text{ЭК}} \cdot \Delta Q_{\text{ХХ}}$$

$$\Delta P'_{\text{КЗ}} = \Delta P_{\text{КЗ}} + k_{\text{ЭК}} \cdot \Delta Q_{\text{КЗ}}$$

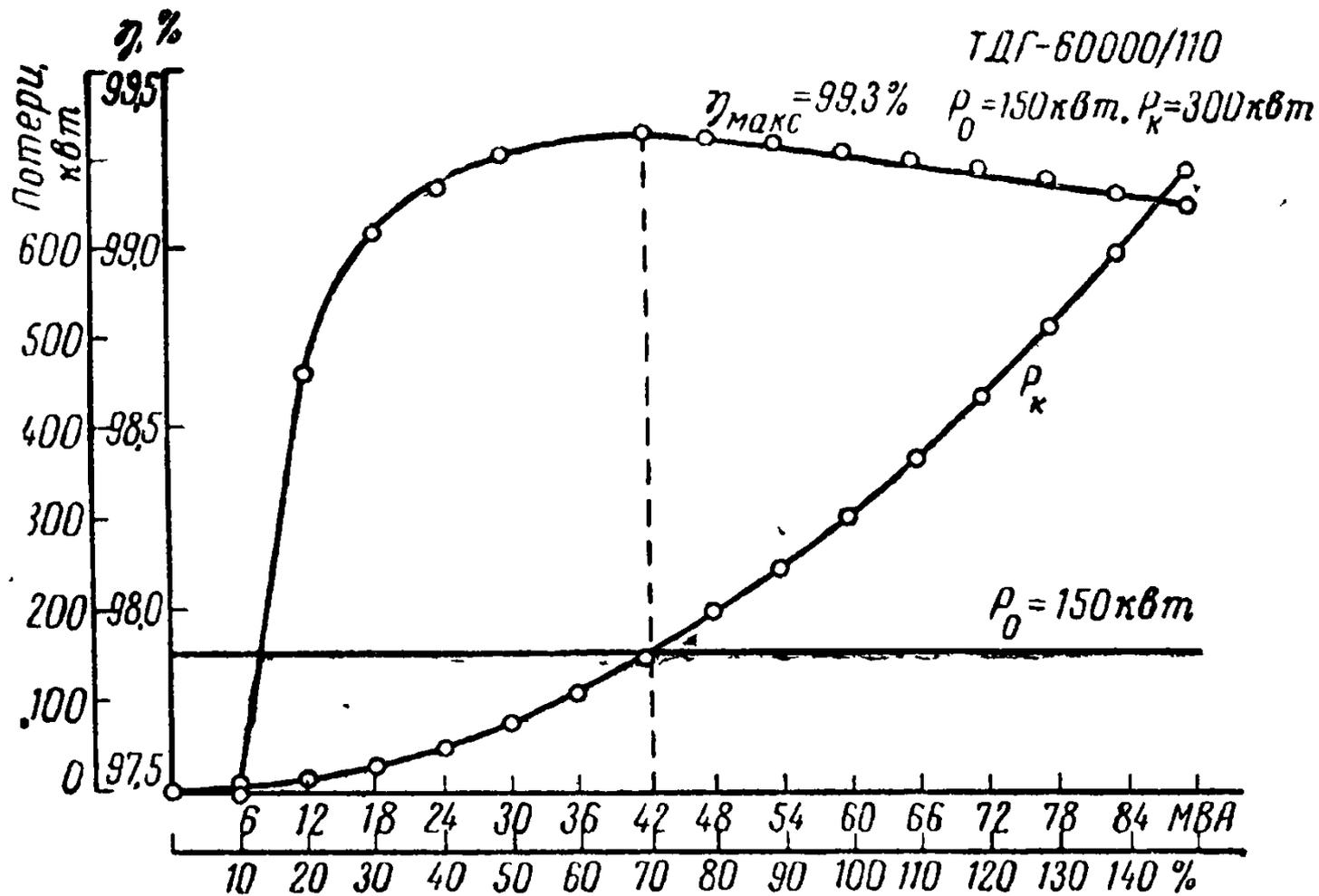
$k_{\text{ЭК}}$ – экономический эквивалент реактивной мощности,
коэффициент, который учитывает потери активной мощности в
киловаттах, связанные с производством и распределением 1
кВАр реактивной мощности (размерность кВт/кВАр)

Схема-таблица значений экономического эквивалента реактивной мощности

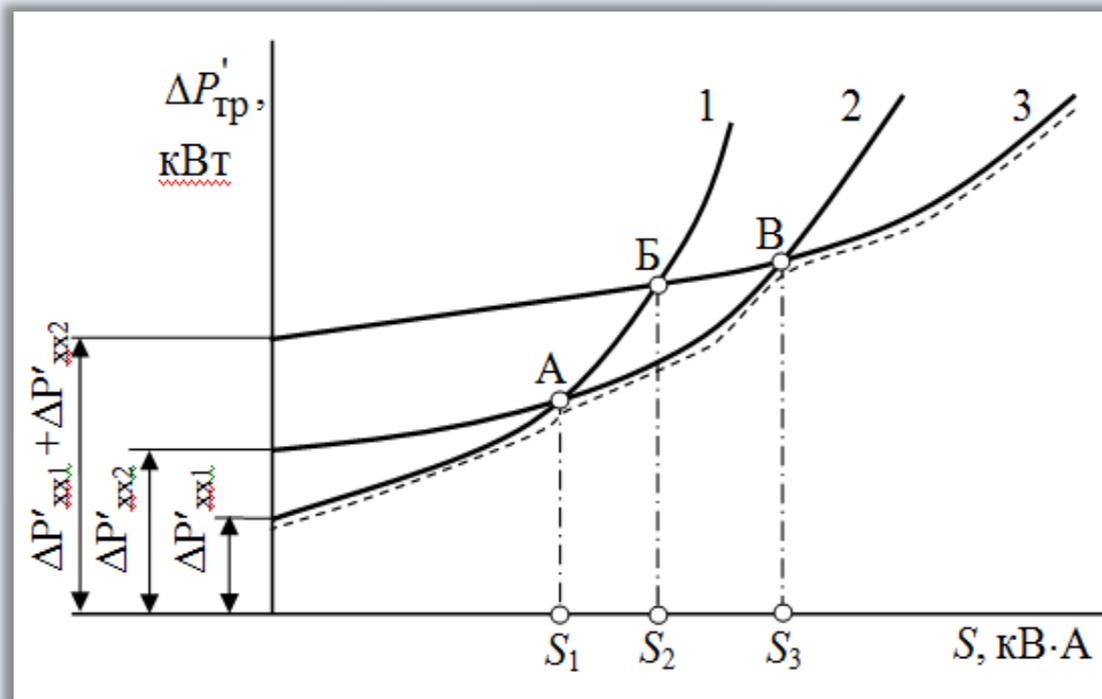


В скобках даны значения в часы минимума нагрузки энергосистемы

Зависимость КПД тр-ра от $\Delta P_{хх}$ и $\Delta P_{кз}$ при разных нагрузках



Кривые приведенных потерь мощности



Приведенные потери активной мощности в силовых трансформаторах:

- 1 и 2 – кривые потерь активной мощности в трансформаторах 1 и 2 при раздельной их работе
- 3 – кривая суммарных потерь активной мощности в трансформаторах 1 и 2 при их параллельной работе

Экономический режим работы трансформаторов одинаковой мощности

$$n \cdot (\Delta P_{\text{XX}} + k_{\text{ЭК}} \cdot \Delta Q_{\text{XX}}) + \frac{1}{n} \cdot (\Delta P_{\text{КЗ}} + k_{\text{ЭК}} \cdot \Delta Q_{\text{КЗ}}) \cdot \left(\frac{S}{S_{\text{НОМ.ТР}}}\right)^2 =$$
$$= (n + 1) \cdot (\Delta P_{\text{XX}} + k_{\text{ЭК}} \cdot \Delta Q_{\text{XX}}) + \frac{1}{n + 1} \cdot (\Delta P_{\text{КЗ}} + k_{\text{ЭК}} \cdot \Delta Q_{\text{КЗ}}) \cdot \left(\frac{S}{S_{\text{НОМ.ТР}}}\right)^2.$$

Нагрузка подстанции S , при которой экономически выгодно переходить с n трансформаторов на $n+1$, определяется из равенства потерь мощности при n и $n+1$ трансформаторах, что соответствует точке пересечения кривых приведенных потерь

Подключение $(n+1)$ трансформатора целесообразно, когда выполняется условие

$$S \geq S_{\text{НОМ.ТР}} \sqrt{n \cdot (n + 1) \cdot \frac{\Delta P_{\text{XX}} + k_{\text{ЭК}} \cdot \Delta Q_{\text{XX}}}{\Delta P_{\text{КЗ}} + k_{\text{ЭК}} \cdot \Delta Q_{\text{КЗ}}}}.$$



Экономический режим работы трансформаторов разной мощности

При параллельной работе приведенные потери мощности для построения кривых определяются по выражению

$$\sum \Delta P = n \cdot (\Delta P_{\text{XX}} + k_{\text{Э}} \cdot \Delta Q_{\text{XX}}) + \frac{1}{n} \cdot (\Delta P_{\text{КЗ}} + k_{\text{Э}} \cdot \Delta Q_{\text{КЗ}}) \cdot k_3^2$$

Переменная
величина

Пример

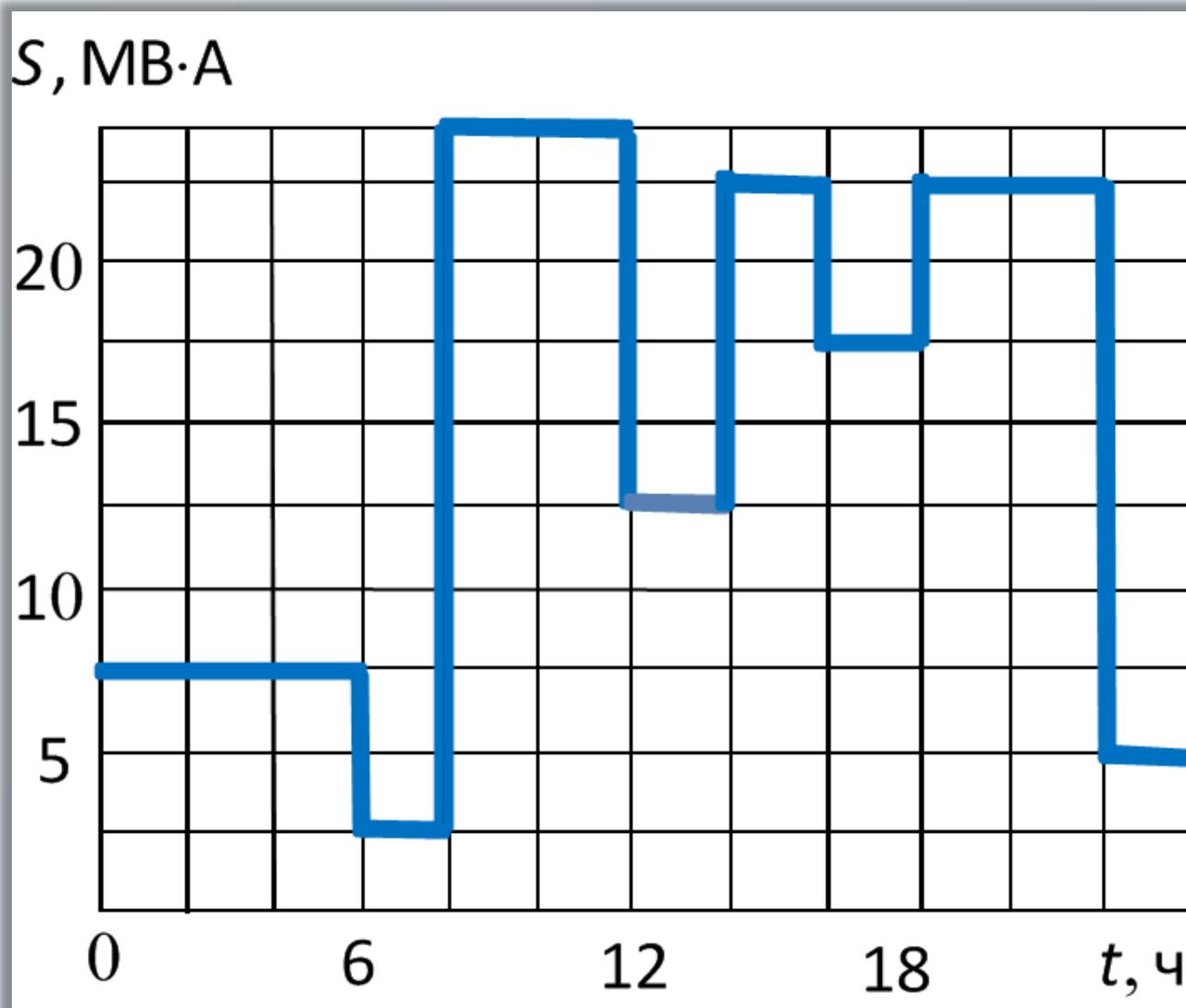
Определить экономически целесообразный режим работы трансформаторов

Технические данные трансформаторов 35/6 кВ:

- $S_{ном} = 16000 \text{кВ}\cdot\text{А}$
- $\Delta P_{хх} = 21 \text{кВт}$
- $\Delta P_{кз} = 85 \text{ кВт}$
- $I_{хх} = 0,85 \%$
- $U_{кз} = 10,5\%$

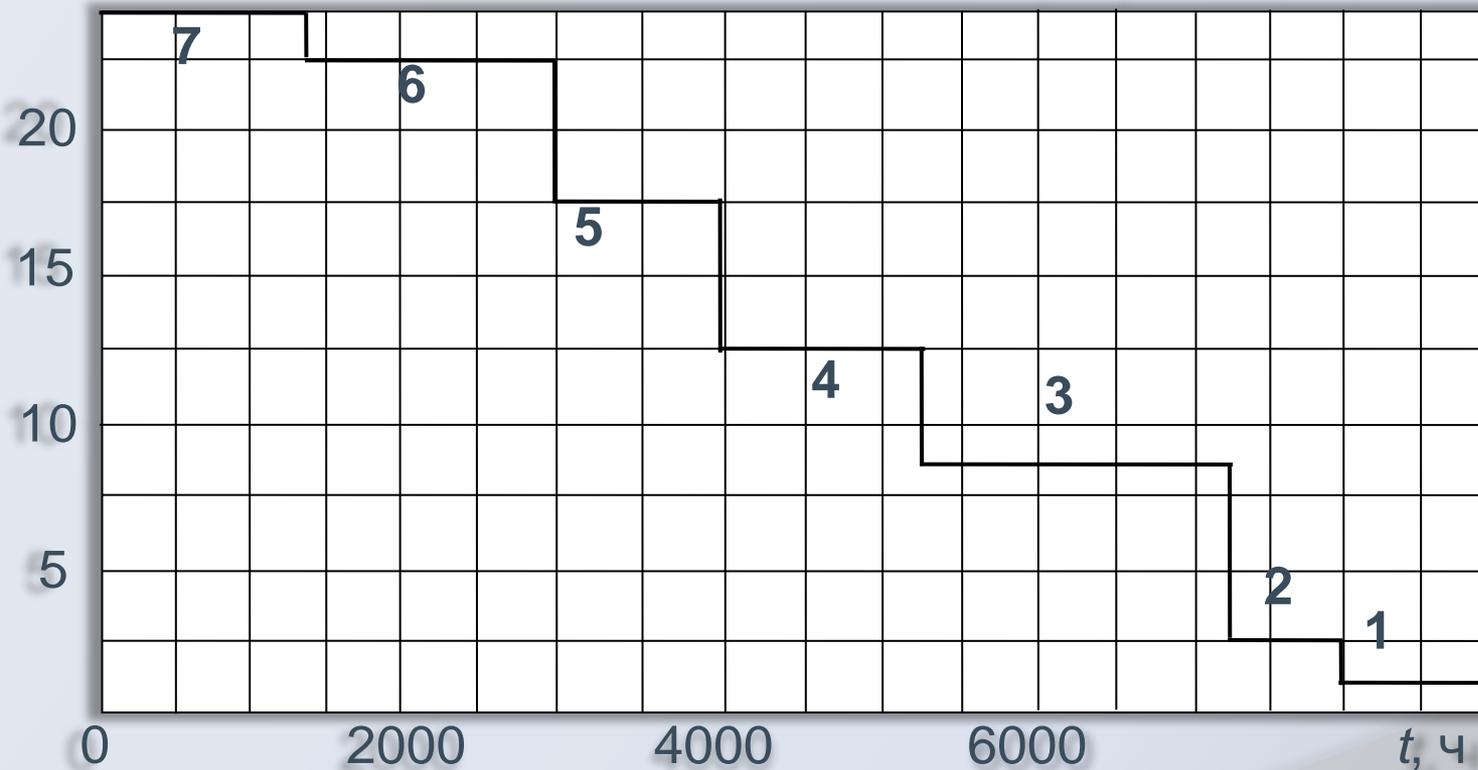


Характерный суточный график нагрузки



Годовой график нагрузки по продолжительности

S , тыс. кВ·А



Решение

Принимаем $k_{\text{э}} = 0,05$ кВт/кВар

$$\Delta Q_{\text{XX}} = S_{\text{НОМ.ТР}} \cdot \frac{I_{\text{XX}}}{100} = 16000 \cdot \frac{0,85}{100} = 136 \quad \text{кВар}$$

$$\Delta Q_{\text{КЗ}} = S_{\text{НОМ.ТР}} \cdot \frac{U_{\text{КЗ}}}{100} = 16000 \cdot \frac{10,5}{100} = 1680 \quad \text{кВар}$$

Приведенные потери мощности XX, кВт

$$\Delta P'_{\text{XX}} = \Delta P_{\text{XX}} + k_{\text{э}} \cdot \Delta Q_{\text{XX}} = 21 + 0,05 \cdot 136 = 28$$

Приведенные потери мощности КЗ, кВт

$$\Delta P'_{\text{КЗ}} = \Delta P_{\text{КЗ}} + k_{\text{э}} \cdot \Delta Q_{\text{КЗ}} = 85 + 0,05 \cdot 1680 = 169$$



Приведенные потери мощности в одном трансформаторе, кВт

$$\Delta P'_{16000} = \Delta P'_{\text{xx}} + k_{\text{загр}}^2 \cdot \Delta P'_{\text{кз}} = 28 + k_{\text{загр}}^2 \cdot 169$$

Суммарные приведенные потери мощности в двух отдельно работающих трансформаторах

$$\begin{aligned} \Delta P'_{2 \cdot 16000} &= 2 \cdot \Delta P'_{\text{xx}} + 2 \cdot k_{\text{загр}0,5}^2 \cdot \Delta P'_{\text{кз}} = 2 \cdot 28 + 2 \cdot k_{\text{загр}0,5}^2 \cdot 169 = \\ &= 56 + k_{\text{загр}0,5}^2 \cdot 338 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

$k_{\text{загр}0,5}$ – новый коэффициент загрузки за счет деления нагрузки пополам между двумя одинаковыми трансформаторами

Нагрузка, при которой целесообразно переходить на работу с двумя трансформаторами, кВА

$$S_{\text{А}} = S_{\text{ном.тр}} \cdot \sqrt{n \cdot (n+1) \cdot \frac{\Delta P'_{\text{xx}}}{\Delta P'_{\text{кз}}}} = 16000 \cdot \sqrt{1 \cdot (1+1) \cdot \frac{28}{169}} = 9210$$



Потребление ЭЭ за год (находим по графику нагрузки)

$$W_{\text{год}} = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot t_i = 129575 \text{ млн. кВтч}$$

Число часов использования максимума нагрузки:

$$T_{\text{max}} = \frac{W_{\text{год}}}{P_{\text{max}}} = 5183 \text{ ч}$$

Число часов максимальных потерь

$$\tau_{\text{max}} = (0,124 + T_{\text{max}} / 10000)^2 \cdot 8760 = 3614 \text{ ч}$$

Распределение числа часов максимальных потерь пропорционально продолжительности ступеней графика нагрузки (пример для ступени №1) определяем через пропорцию

$$\begin{array}{l} T_{\text{год}} \rightarrow \tau_{\text{max}} \\ T_i \rightarrow \tau_i = x \end{array} \quad \tau_1 = \frac{\tau_{\text{max}} \cdot T_1}{T_{\text{год}}} = \frac{3614 \cdot 730}{8760} = 301 \text{ ч}$$

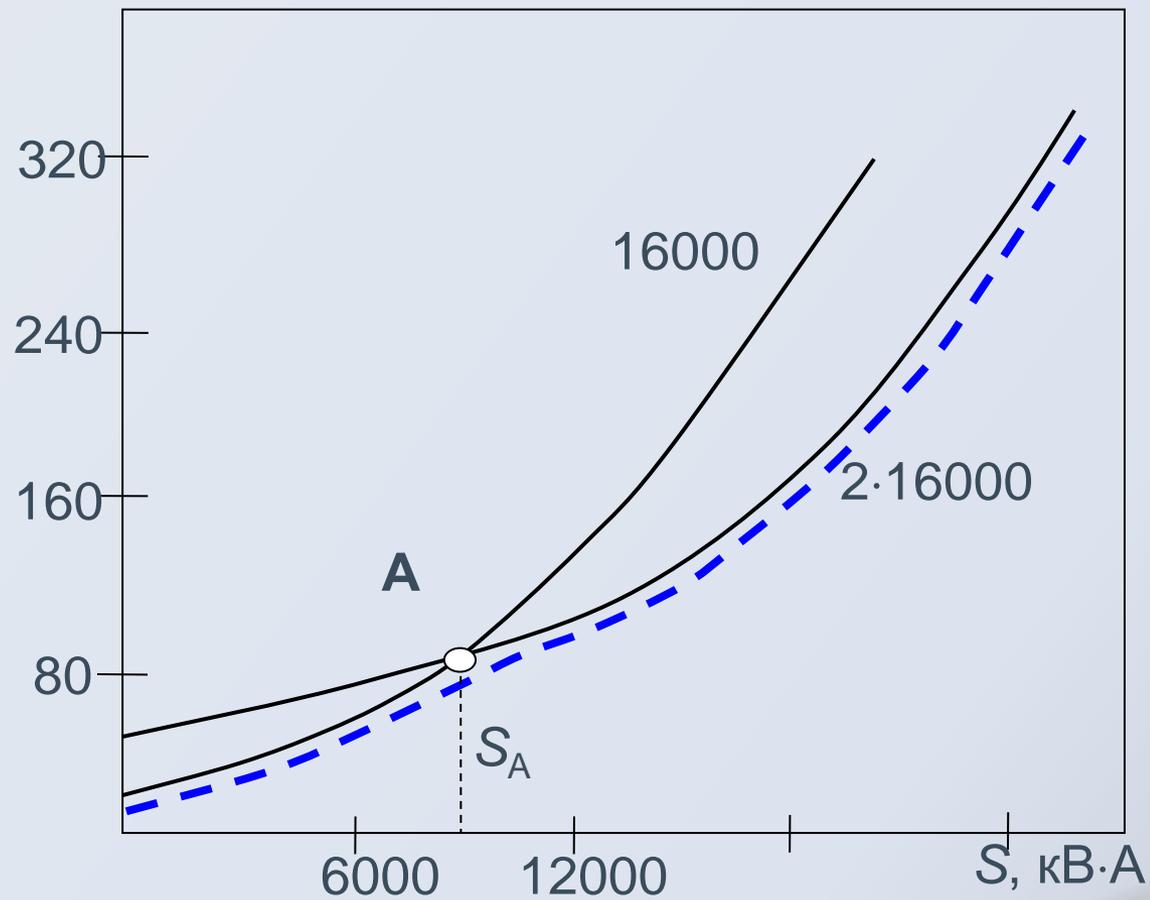


Годовые потери мощности и электроэнергии

№	Нагрузка кВ·А	$K_{загр}$	$K_{загр0,5}$	T , час	t , час	$\Delta P'$, кВт	$\Delta P''$, кВт	$\Delta W'$, тыс. кВтч	$\Delta W''$, тыс. кВтч
1	2500	0,156	0	730	301	32,1	56	21678	40880
2	5000	0,313	0,156	730	301	44,6	64,2	25424	43356
3	7500	0,469	0,234	2190	904	65,2	74,5	94925	139371
4	12500	0,781	0,390	730	301	131,1	107,4	51468	56354
5	17500	1,094	0,547	730	301	230,3	157,1	81322	71321
6	22500	1,4	0,703	2190	904	359,2	223	360761	273647
7	25000	1,562	0,781	1460	602	440,3	262,2	289105	205872

Суммарные потери энергии в экономическом режиме работы трансформаторов – 744,334 млн. кВтч (или 0,6% от потребления ЭЭ)

Графическое решение



3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ



Условия параллельной работы трансформаторов (ПТЭ)

1. Одинаковые группы соединения обмоток
2. Соотношение мощностей трансформаторов не более 1:3
3. Коэффициенты трансформации отличаются не более чем на $\pm 0,5\%$
4. Напряжения короткого замыкания отличаются не более чем на $\pm 10\%$

Для выравнивания нагрузки между параллельно работающими трансформаторами с отличными напряжениями КЗ допускается в небольших пределах изменение коэффициента трансформации путем переключения ответвлений при условии, что ни один из трансформаторов не будет перегружен.

При этом будет наблюдаться прирост потерь за счет уравнительных токов



Нарушение условий

- Нарушение первого и третьего условий вызывает появление больших уравнительных токов между обмотками трансформаторов, которые приводят к быстрому чрезмерному их нагреву
- Нарушение четвертого условия вызывает перегрузку тех трансформаторов, у которых напряжение короткого замыкания имеет меньшее значение



Уравнительные токи

Уравнительные токи протекая между обмотками параллельно работающих трансформаторов вызывают циркуляцию мощности от одного трансформатора к другому, следовательно неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь мощности от нагрева.



Нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется пропорционально их мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания

$$U'_{кз1} = U_{кз1} \cdot \frac{S_{ном.тр1}}{S_{ном.тр1}}; \quad U'_{кз2} = U_{кз2} \cdot \frac{S_{ном.тр1}}{S_{ном.тр2}};$$

$$U'_{кзн} = U_{кзн} \cdot \frac{S_{ном.тр1}}{S_{ном.трn}}.$$

Напряжения короткого замыкания всех параллельно работающих трансформаторов должны быть приведены к одной мощности, например, к мощности первого трансформатора



Нагрузка каждого //
работающего
трансформатора

$$S_1 = \lambda_1 \cdot S$$

$$S_2 = \lambda_2 \cdot S$$

$$S_n = \lambda_n \cdot S$$

S – суммарная
нагрузка подстанции

Коэффициенты загрузки
трансформаторов –
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{U'_{к31}} + \frac{1}{U'_{к32}} + \dots + \frac{1}{U'_{к3n}} \right) \cdot U'_{к31}}$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{k \cdot U'_{к31}}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{k \cdot U'_{к32}}$$

$$\lambda_n = \frac{1}{k \cdot U'_{к3n}}$$



Коэффициенты загрузки трансформаторов – λ_1, λ_2 при их // работе

$$\lambda_1 = \frac{U'_{к32}}{U'_{к31} + U'_{к32}}$$

$$\lambda_2 = \frac{U'_{к31}}{U'_{к31} + U'_{к32}}$$



Пример

Наилучшее использование установленной мощности трансформаторов может быть только при равенстве напряжений КЗ. Однако в эксплуатации допускается включение на параллельную работу трансформаторов с отклонением напряжений КЗ от их среднего значения, но не более чем на $\pm 10\%$.

Это допущение связано с возможным отступлением (в пределах производственных допусков) при изготовлении трансформаторов в размерах обмоток, влияющий на U_K .



- Не рекомендуется включение на параллельную работу трансформаторов с отношением номинальных мощностей более трех
- Объясняется это тем, что даже при небольших эксплуатационных перегрузках трансформатора меньшей мощности может оказаться сильно перегруженным в процентном отношении и, особенно в том случае, если он имеет меньшее U_K



Исходные данные

Параллельно работают три трансформатора со следующими характеристиками

$$S_{\text{ном.тр1}} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_{\text{кз1}} = 10,5\%;$$

$$S_{\text{ном.тр2}} = 32 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_{\text{кз2}} = 10,5\%;$$

$$S_{\text{ном.тр3}} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_{\text{кз3}} = 10,41\%.$$

Нагрузка подстанции составляет $S = 75 \text{ МВА}$

Определить нагрузку каждого трансформатора



Приведение напряжения короткого замыкания к мощности первого трансформатора $S_{\text{НОМ.тр1}}$

$$U'_{\text{кз1}} = U_{\text{кз1}} \cdot \frac{S_{\text{НОМ.тр1}}}{S_{\text{НОМ.тр1}}} = 10,5 \cdot \frac{25}{25} = 10,5\%;$$

$$U'_{\text{кз2}} = U_{\text{кз2}} \cdot \frac{S_{\text{НОМ.тр1}}}{S_{\text{НОМ.тр2}}} = 10,5 \cdot \frac{25}{32} = 8,35\%;$$

$$U'_{\text{кз3}} = U_{\text{кз3}} \cdot \frac{S_{\text{НОМ.тр1}}}{S_{\text{НОМ.тр3}}} = 10,41 \cdot \frac{25}{40} = 6,52\%.$$

Коэффициент k равен

$$k = \frac{1}{U'_{\text{кз1}}} + \frac{1}{U'_{\text{кз2}}} + \frac{1}{U'_{\text{кз3}}} = \frac{1}{10,5} + \frac{1}{8,35} + \frac{1}{6,52} = 0,368.$$



Коэффициенты загрузки

$$\lambda_1 = \frac{1}{k \cdot U'_{\text{кз1}}} = \frac{1}{0,368 \cdot 10,5} = 0,259;$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{k \cdot U'_{\text{кз2}}} = \frac{1}{0,368 \cdot 8,35} = 0,325;$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{k \cdot U'_{\text{кз3}}} = \frac{1}{0,368 \cdot 6,52} = 0,416.$$



Определение нагрузки каждого трансформатора

$$S_1 = \lambda_1 \cdot S = 0,259 \cdot 75 = 19,4 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_2 = \lambda_2 \cdot S = 0,325 \cdot 75 = 24,4 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_3 = \lambda_3 \cdot S = 0,416 \cdot 75 = 31,2 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$



Пример

- При включении на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации напряжения на зажимах их вторичных обмоток будут различными. Разность вторичных напряжений вызывает прохождение уравнивающих токов
- Уравнивающие токи, загружая обмотки трансформаторов, увеличивают потери энергии и снижают суммарную мощность подстанции, поэтому прохождение их недопустимо
- Согласно ГОСТа у трансформаторов, включаемых на параллельную работу, коэффициенты трансформации не должны отличаться более чем на $\pm 0,5 \%$



Исходные данные

Два трансформатора с разными значениями вторичных напряжений включаются на параллельную работу.

Трансформаторы имеют следующие технические данные:

- $S_1 = S_2 = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
- $U_1 = 10,5 \text{ кВ}; U_2 = 10 \text{ кВ}, U_{к1} = U_{к2} = 8,5 \%$
- группы соединений обмоток одинаковые

Определить уравнительный ток после включения трансформаторов на параллельную работу.



Решение

1. Находим номинальные токи трансформаторов

$$\text{➤ } I_1 = (40 \cdot 10^6) / (\sqrt{3} \cdot 10500) = 2202 \text{ A}$$

$$\text{➤ } I_2 = (40 \cdot 10^6) / (\sqrt{3} \cdot 10000) = 2312 \text{ A}$$

2. Полные сопротивления короткого замыкания

$$Z_K = (U_{K3\%} U_{\text{НОМ}}) / 100 I_{\text{НОМ}}$$

$$\text{➤ } Z_{K1} = (8,5 \cdot 10500) / (100 \cdot 2202) = 0,405 \text{ Ом}$$

$$\text{➤ } Z_{K2} = (8,5 \cdot 10000) / (100 \cdot 2312) = 0,367 \text{ Ом}$$

3. Разность вторичных напряжений

$$\Delta U = 10500 - 10000 = 500$$

4. Уравнительный ток

$$I_y = \Delta U / (Z_{K1} + Z_{K2})$$

$$I_y = 500 / (0,405 + 0,367) = 647,6 \text{ A}$$



Пример

Параллельная работа трансформаторов, принадлежащих к разным группам соединений, невозможна по той причине, что между их вторичными обмотками возникает напряжение, обусловленное углом сдвига φ между векторами вторичных напряжений

Уравнительный ток I_{y2}

$$I_{y2} = \frac{200 \sin \frac{\varphi}{2}}{\left(\frac{U_{k1}}{I_{ном1}} + \frac{U_{k2}}{I_{ном2}} \right)}$$

где:

- φ - угол сдвига векторных вторичных напряжений трансформаторов
- $I_{ном1}$ и $I_{ном2}$ - номинальные токи первого и второго трансформаторов



Пояснения к формуле

$$I_{y2} = \frac{200 \sin \frac{\varphi}{2}}{\left(\frac{U_{k1}}{I_{ном1}} + \frac{U_{k2}}{I_{ном2}} \right)} = \frac{\overset{\circ}{U}_{ном1} - \overset{\circ}{U}_{ном2}}{Z_{к1} + Z_{к2}} =$$
$$= \frac{\overset{\circ}{U}_{ном1} - \overset{\circ}{U}_{ном2}}{\frac{U_{k1} \overset{\circ}{U}_{ном1}}{100 I_{ном1}} + \frac{U_{k2} \overset{\circ}{U}_{ном2}}{100 I_{ном2}}}$$

Так как $\overset{\circ}{U}_{ном1} = \overset{\circ}{U}_{ном2}$, то

$$\overset{\circ}{U}_{ном1} - \overset{\circ}{U}_{ном2} = 2 \overset{\circ}{U}_{ном1} \sin \frac{\alpha}{2}.$$



Исходные данные

Определить уравнивающий ток, предположив, что на параллельную работу были ошибочно включены два трансформатора, имеющих одинаковые технические данные

$$\triangleright I_{\text{ном1}} = I_{\text{ном2}} = I_{\text{ном}}$$

$$\triangleright U_{\text{к1}} = U_{\text{к2}} = U_{\text{к}},$$

при наличии сдвига векторов линейных напряжений вторичных обмоток на угол 60° (например, при группах соединений $Y/D-11$ и $Y/D-1$).



Решение

Уравнительный ток

$$I_{y2} = (200 \cdot 0,5) / (2U_K / I_{\text{ном}}) = (50/U_K) \cdot I_{\text{ном}}$$

Если предположить, что $U_K = 7,5$, то уравнительный ток достигнет почти семикратного номинального значения. Поэтому параллельная работа трансформаторов с разными группами соединений обмоток невозможна.

Но во вторичной обмотке энергия также теряется на нагревание проводов, на что затрачивается еще некоторая мощность

$$P_{\text{пр2}} = I_2^2 r_2$$

Таким образом, во вторичную цепь передается мощность

$$P_2 = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c - P_{\text{пр2}} = U_1 I_1 \cos \varphi_1 - I_1^2 r_1 - P_c - I_2^2 r_2$$



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

