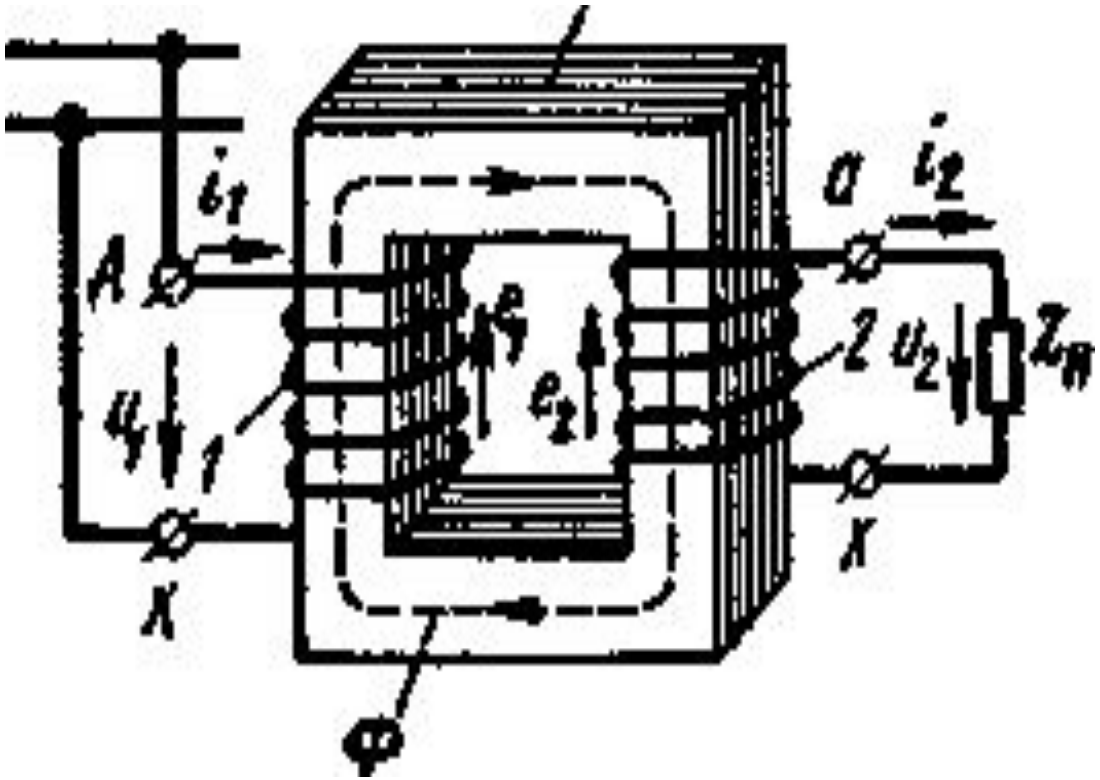
Электрические трансформаторы

Характеристики трансформаторов

Принцип действия трансформатора



Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток, размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала.

Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т. е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток трансформатора.

Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока — электрической сети с напряжением U_1.

Ко вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_H.

Обмотку более высокого напряжения называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН), а низкого напряжения — *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами ***A*** и ***X***; обмотки НН — буквами ***a*** и ***x***.

- При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1, который создает переменный магнитный поток Ф, замыкающийся по магнитопроводу.
- Поток Ф индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС — e_1 и e_2, пропорциональные, согласно закону Максвелла, числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$.
- Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке:

$$e_1 = w_1 \, d\Phi/dt; \qquad e_2 = w_2 d\Phi/dt$$

- Следовательно, отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением:

$$E_1 / E_2 = e_1 / e_2 = w_1 / w_2$$

- Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3 — 5% от номинальных значений напряжений U_1 и U_2, и считать $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то получится:

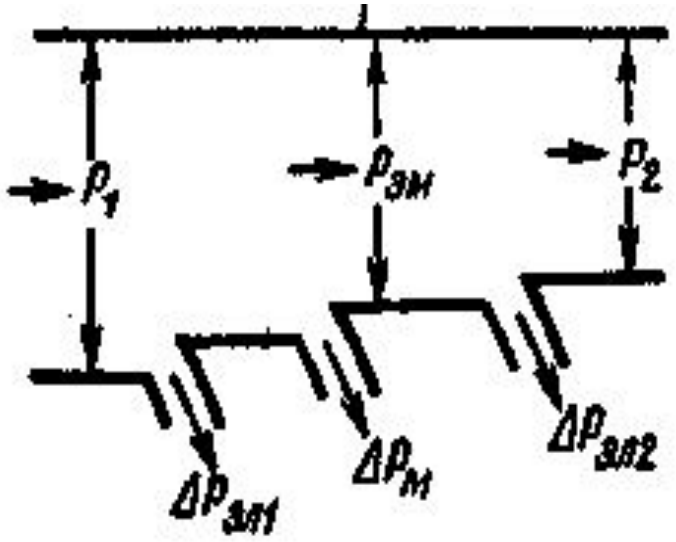
$$U_1 / U_2 = w_1 / w_2$$

- *Следовательно, подбирая соответствующим образом число витков обмоток, при заданном напряжении U_1 можно получить желаемое напряжение U_2.*
- Коэффициент трансформации $k = E_1 / E_2 = w_1 / w_2$

Коэффициент полезного действия трансформатора

- При работе в трансформаторе возникают потери энергии.
- *Коэффициентом полезного действия трансформатора* (**КПД**) называют отношение отдаваемой мощности P_2 к мощности P_1 поступающей в первичную обмотку:
- $$\eta = P_2/P_1 = (U_2 I_2 \cos \varphi_2)/(U_1 I_1 \cos \varphi_1)$$
- или $$\eta = (P_1 - \Delta P)/P_1 = 1 - \Delta P/(P_2 + \Delta P),$$
- где ΔP — суммарные потери в трансформаторе.
- Высокие значения КПД трансформаторов не позволяют определять его с достаточной степенью точности путем непосредственного измерения мощностей P_1 и P_2, поэтому его вычисляют ***косвенным методом*** по значению потерь мощности.
- Процесс преобразования энергии в трансформаторе характеризует **энергетическая диаграмма.**

Энергетическая диаграмма трансформатора



При передаче энергии из первичной обмотки во вторичную возникают электрические потери мощности в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток $\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{эл2}$, а также магнитные потери в стали магнитопровода $\Delta P_{м}$ (от вихревых токов и гистерезиса).

То есть:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{эл2} - \Delta P_{м}$$

Тогда КПД можно определить по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{м}}$$

Величину $P_{эм} = P_1 — \Delta P_{эл1} — \Delta P_{м}$, поступающую во вторичную обмотку, называют *внутренней электромагнитной мощностью трансформатора*. Она определяет габаритные размеры и массу трансформатора.

Потери мощности в трансформаторе

- С достаточной точностью можно считать, что *магнитные потери в стали магнитопровода* равны *мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе и номинальном первичном напряжении*, т. е.

$$\Delta P_м \approx P_0.$$

- *Величину потерь в обмотках в номинальном режиме работы -* $\Delta P_{эл.н}$ *можно с достаточной степенью точности принять равной мощности* $P_к$, *потребляемой трансформатором* при опыте короткого замыкания, который проводится при ***номинальном токе нагрузки***.
- Таким образом, $\Delta P_{эл} = \beta^2 P_к$,
- *где* β – коэффициент загрузки трансформатора.
- Полные потери в трансформаторе:
- $$\Delta P = P_о + \beta^2 P_к$$
- Тогда КПД трансформатора:

$$\eta = 1 - (\beta^2 P_к + P_0)/(\beta S_н \cos\varphi_2 + \beta^2 P_к + P_0)$$

Государственные стандарты по силовым трансформаторам

- В настоящее время в области трансформаторостроения действует ряд государственных стандартов, определяющих основные требования, предъявляемые к силовым трансформаторам классов напряжения от **6 до 750 кВ** для мощностей от **25 до 1 250000 кВА.**
- Эти стандарты можно подразделить на три группы.

1. *Стандарты, содержащие требования, общие для всех силовых трансформаторов*:

- ГОСТ 9680-77. Ряды номинальных мощностей.
- ГОСТ 11677-85. Общие технические условия.
- ГОСТ 3484-77. Методы испытаний.
- ГОСТ 1516-76. Нормы и методы испытаний электрической прочности.
- ГОСТ 20690-75. Нормы и методы испытаний электрической прочности для трансформаторов класса напряжения 750 кВ.
- ГОСТ 14209-84. Нагрузочная способность трансформаторов.
- ГОСТ 16110-82. Силовые трансформаторы. Термины и определения.

2. Стандарты, содержащие основные параметры и технические требования для отдельных серий трансформаторов общего назначения (**табл**.)

3. Стандарты, содержащие основные параметры и технические требования для трансформаторов специального назначения - рудничных, электропечных, преобразовательных и др.

ГОСТ	Вид охлаждения	Число фаз	Класс напряжения, кВ	Диапазон мощностей, кВА
ГОСТ 12022-76	Масляное	3	До 35 вкл.	25 - 630
ГОСТ 11920-85	»	3	До 35 вкл.	1000 - 80 000
ГОСТ 12965-85	»	3	110 и 150	2500 - 400 000
ГОСТ 17544-85	»	1 и 3	220 - 750	40 000 - 1 250 000
ГОСТ18619-80	Воздушное	3	0,66	10 - 160
ГОСТ 14074-76	Воздушное	3	До 15 вкл.	160 -1600

Номинальная мощность

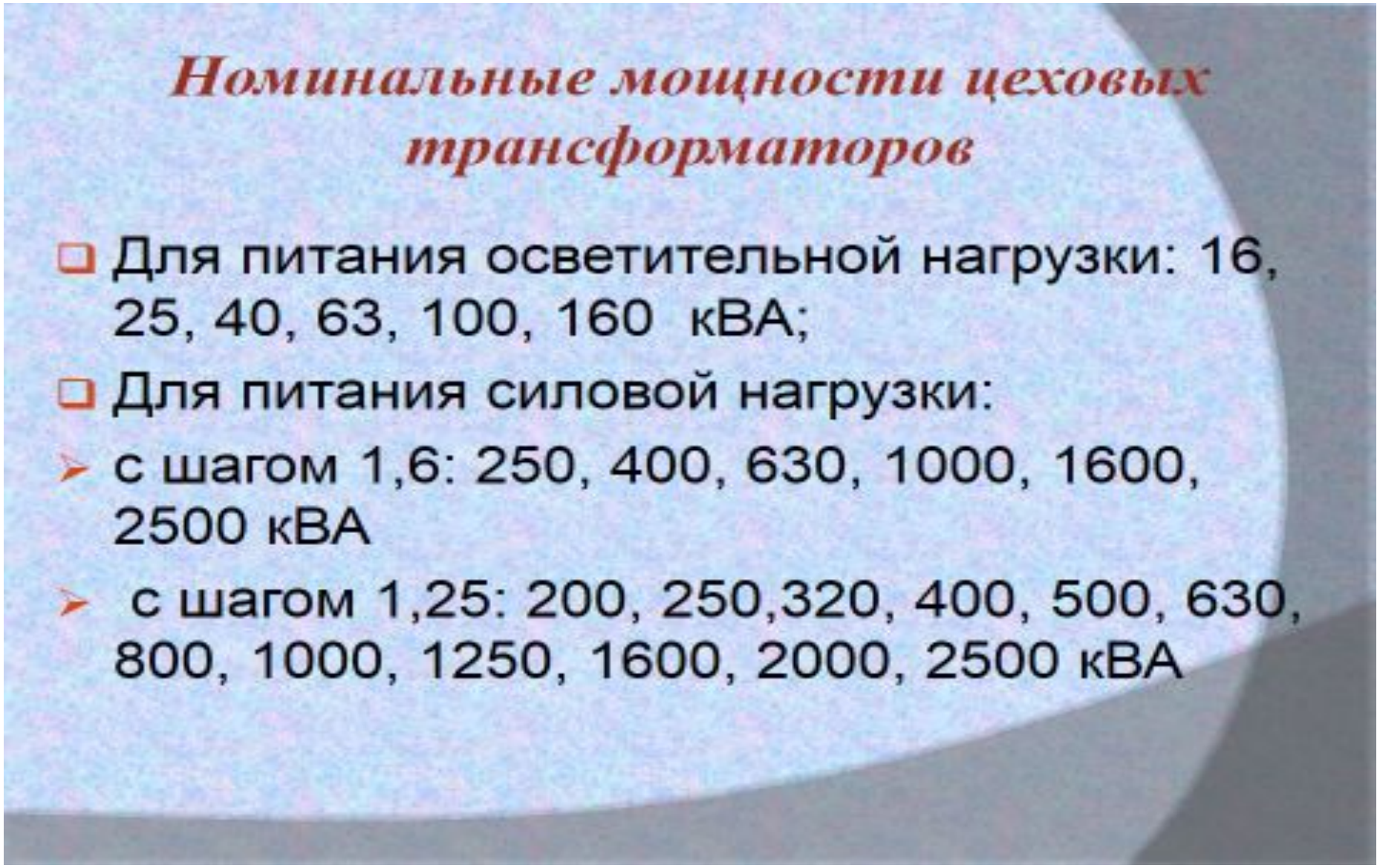
- Номинальные мощности трехфазных трансформаторов должны выбираться из следующего ряда кВА:

0,010	0,100	1,00	**10,0**	**100**	**1000**	**10000**	**100000**	**1000000**
(0,012)	(0,125)	(1,25)	**(12,5)**	**(125)**	**(1250)**	**(12500)**	**125000**	**1250000**
0,016	0,160	1,60	**16,0**	**160**	**1600**	**16000**	**160000**	**1600000**
(0,020)	(0,200)	(2,00)	**(20,0)**	**(200)**	**(2000)**	**(20000)**	**200000**	**2000000**
0,025	0,250	2,50	**25,0**	**250**	**2500**	**25000**	**250000**	**2500000**
				320	**3200**	**32000**		
(0,032)	(0,315)	(3,15)	**(31,5)**	**(315)**	**(3150)**	**(31500)**	**(315000)**	**3150000**
0,040	0,400	4,00	**40,0**	**400**	**4000**	**40000**	**400000**	**4000000**
(0,050)	(0,500)	(5,00)	**(50,0)**	**(500)**	**(5000)**	**(50000)**	**500000**	**5000000**
0,063	0,630	**6,30**	**63,0**	**630**	**6300**	**63000**	**630000**	**6300000**
(0,080)	(0,800)	**(8,00)**	**(80,0)**	**(800)**	**(8000)**	**80000**	**800000**	**8000000**

Номинальная мощность

- Указанные в скобках номинальные мощности должны приниматься только для специальных трехфазных трансформаторов и трансформаторов, предназначенных *для экспорта*.
- Номинальные мощности однофазных трансформаторов, предназначенных для работы в трехфазной группе, должны составлять одну треть номинальных мощностей, указанных в **табл.**
- Для однофазных трансформаторов, не предназначенных для такого применения, значения номинальных мощностей должны приниматься как для трехфазных.
- Для трансформаторов, работающих в блоке с генераторами мощностью свыше 160000 кВА, допускается по согласованию между потребителем и изготовителем, устанавливать мощность, отличающуюся от указанной в табл.

Для питания низковольтных электроприемников с целью уменьшения потерь в трансформаторах предпочтительнее шкала номинальных мощностей с **шагом 1,25.**



Габариты силовых трансформаторов

Габарит	I	II	III	IV
Мощность кВА	<100	100... 1000	1000...6300	>6300
Напряжение кВ	<35			

Габарит	V	VI	VII	VIII
Мощность кВА	<32000	32 000... 80000	80000... 200000	>200000
Напряжение *U1*, кВ	< 110	<330		>330

Схемы соединения обмоток

- Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам «**звезда**», «**звезда с выведенной нулевой точкой**», «**треугольник**» или «**зигзаг с выведенной нулевой точкой**».
- Обычно обмотку высшего напряжения соединяют по схеме «**звезда**», что позволяет при заданном линейном напряжении иметь меньшее число витков в фазе.
- Согласно ГОСТу:

схему соединения «звезда» обозначают знаком Y, русской буквой У или латинской *Y*;

схему «треугольник» — знаком Δ, русской буквой Д или греческой Δ;

схему «зигзаг» — латинской буквой Z.

- Если нулевая точка обмотки выведена из трансформатора, то у буквенного обозначения ставят индекс **н**.
- Начала и концы обмотки ВН обозначают ***A, B, C*** и ***X, Y, Z;*** для обмотки НН — ***a, b, c*** и ***x, y, z;*** вывод нулевой точки — ***O*** **(для ВН)** и ***o*** **(для НН)**.

Схемы соединения обмоток силовых трансформаторов

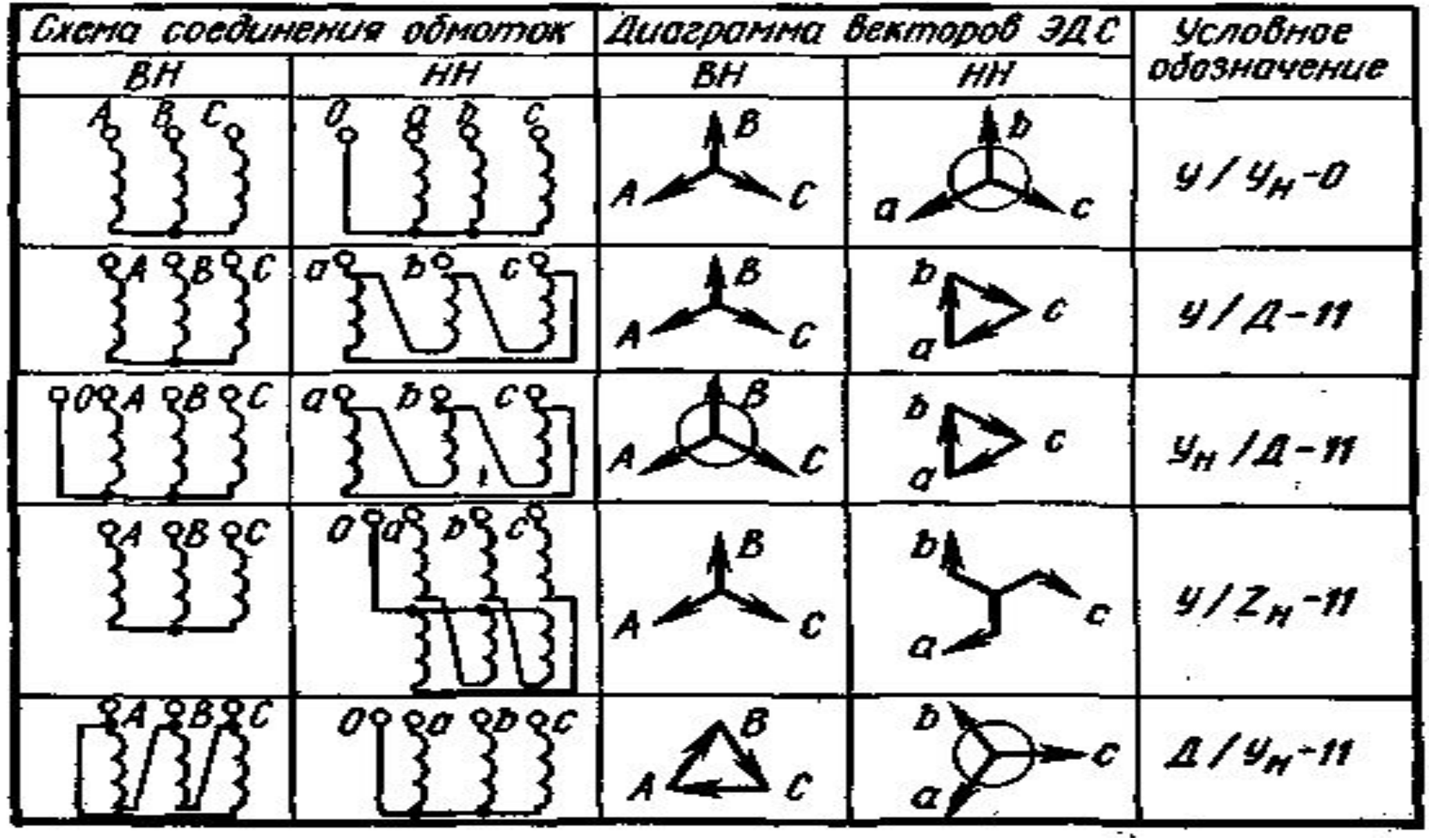
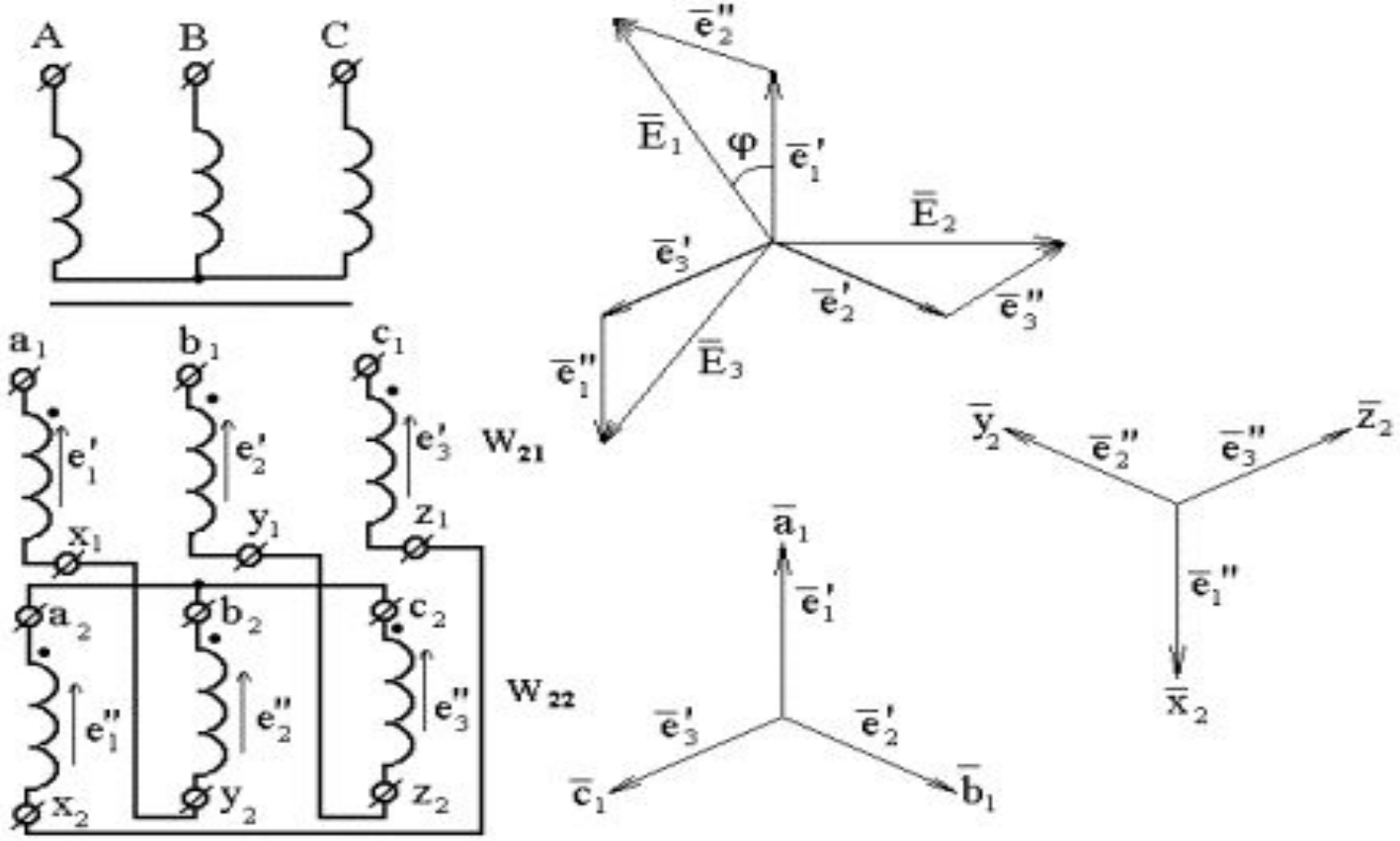


Схема соединения «Зигзаг»



Конец полуобмоток, например x_1 соединен с концом y_2 и т.д.

Начала полуобмоток a_2, $в_2$ и c_2 соединены и образуют нейтраль.

К началам a_1, $в_1$, c_1 присоединяют линейные провода вторичной сети.

При таком соединении э.д.с. обмоток, расположенных на разных стержнях, сдвинуты на угол 120^0.

Схема соединения «Зигзаг»

- Для выполнения схемы зигзаг вторичная обмотка каждой фазы составляется **из двух половин**, одна из которых расположена на одном стержне магнитопровода, вторая — на другом.
- Соединение вторичной обмотки понижающего трансформатора в зигзаг обеспечивает *более равномерное распределение несимметричной нагрузки* НН между фазами первичной сети ВН. При этом обеспечиваются наиболее благоприятные условия работы трансформатора.
- Выполнение трансформаторов со схемой соединения обмотки НН в зигзаг *обходится дороже*, чем со схемой соединения обмотки НН в звезду, так как соединение в зигзаг требует большего (**на 15%)** числа витков обмотки НН.
- Это объясняется тем, что ЭДС обмоток, расположенных на разных стержнях, складываются геометрически под углом 120° и их суммарное значение на 15% меньше, чем при алгебраическом сложении ЭДС двух обмоток, расположенных на одном стержне магнитопровода.
- Чтобы получить ЭДС одного и того же значения при соединении в зигзаг, нужно на 15 % больше витков, чем при соединении обмотки НН в звезду.
- Из-за большей сложности изготовления и более высокой стоимости трансформаторы звезда — зигзаг применяются редко.

Группы соединения обмоток трансформатора

- ***Группа соединений обмоток трансформатора характеризует взаимную ориентацию векторов напряжений первичной и вторичной обмоток.***
- Изменение взаимной ориентации этих напряжений осуществляется соответствующей перемаркировкой начал и концов обмоток.
- Стандартные обозначения начал и концов обмоток высокого и низкого напряжения показаны на рис.1.

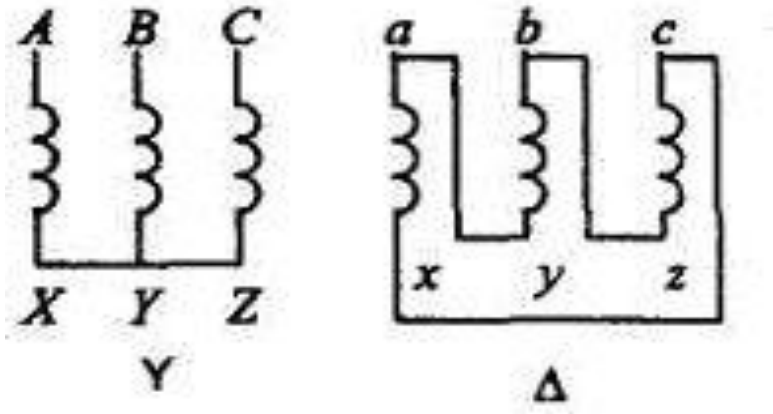


Рис. 1. Стандартные обозначения

Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов

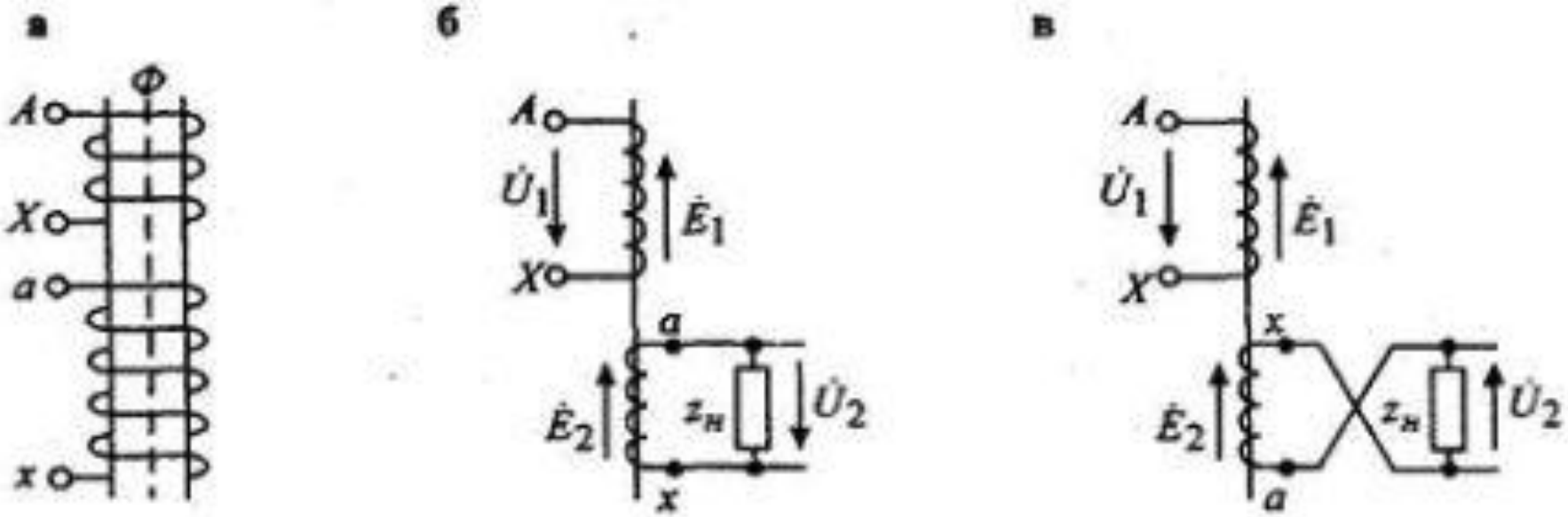


Рис. 2.

- Обе обмотки расположены на одном стержне и имеют одинаковое направление намотки (рис. 2а).
- Тогда ЭДС *E1* и *E2* будут совпадать по фазе и соответственно будут совпадать напряжение сети *U1* и напряжение на нагрузке *U2* (рис. 2 б).
- Если теперь во вторичной обмотке принять обратную маркировку зажимов (рис. 2 в), то по отношению к нагрузке ЭДС *E2* меняет фазу на 180°. Следовательно, и фаза напряжения *U2* меняется на 180°.
- Таким образом, в однофазных трансформаторах возможны две группы соединений, соответствующих углам сдвига 0 и 180°.

Группы соединения обмоток трансформатора

- На практике для удобства обозначения групп используют циферблат часов.
- Напряжение первичной обмотки ***U1*** **изображают минутной стрелкой**, *установленной постоянно на цифре 12*, а **часовая стрелка** занимает различные *положения в зависимости от угла сдвига между* ***U1*** *и* ***U2***.
- Сдвиг 0° соответствует группе 0, а сдвиг 180° - группе 6 (рис. 3).

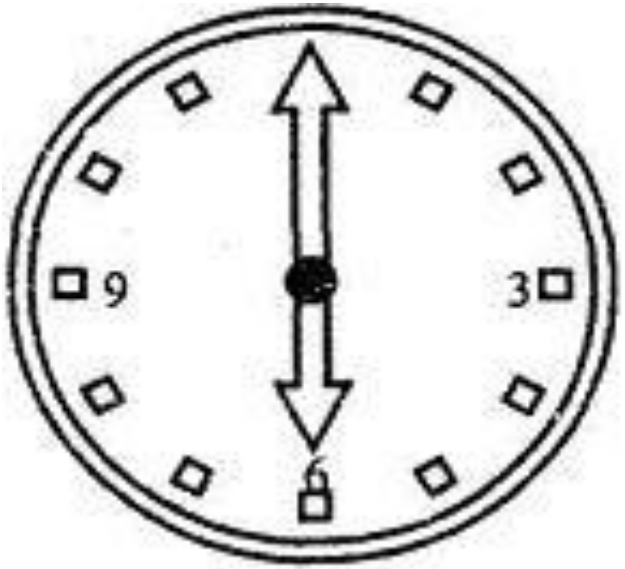
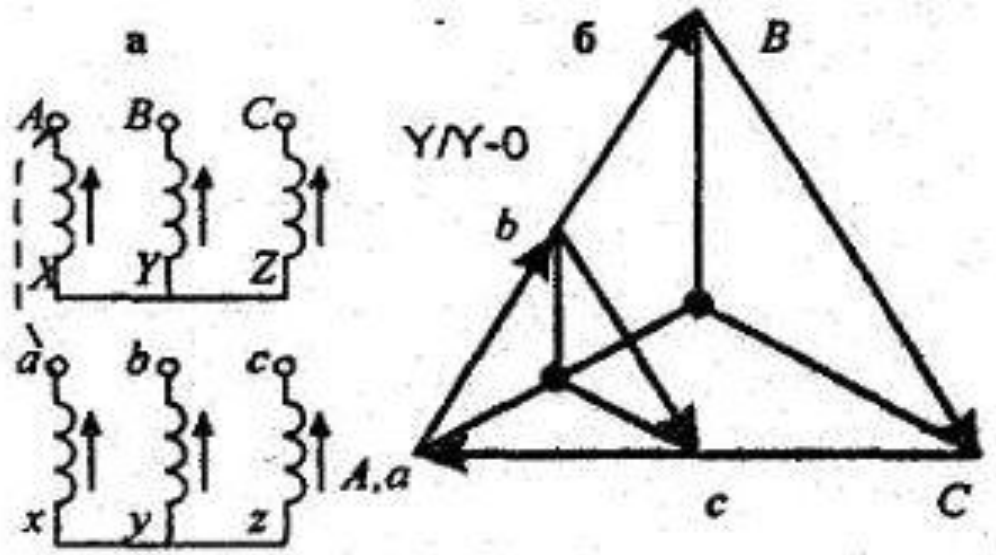


Рис.3

Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

- В трехфазных трансформаторах можно получить 12 различных групп соединений обмоток.
- Например, обмотки трансформатора соединены по схеме Y/Y (рис. 4).
- Для маркировки на рис. 4а, ЭДС соответствующих фаз первичной и вторичной обмоток совпадают, поэтому будут совпадать линейные и фазные напряжения первичной и вторичной обмоток (рис. 4, б). Схема имеет группу Y/Y - 0.



- Рис. 4

Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

- Если изменить маркировку зажимов вторичной обмотки на противоположную (рис. 5. а, то при перемаркировке концов и начал вторичной обмотки фаза ЭДС меняется на 180°.
- Следовательно, номер группы меняется на 6. Данная схема имеет группу Y/Y - 6.

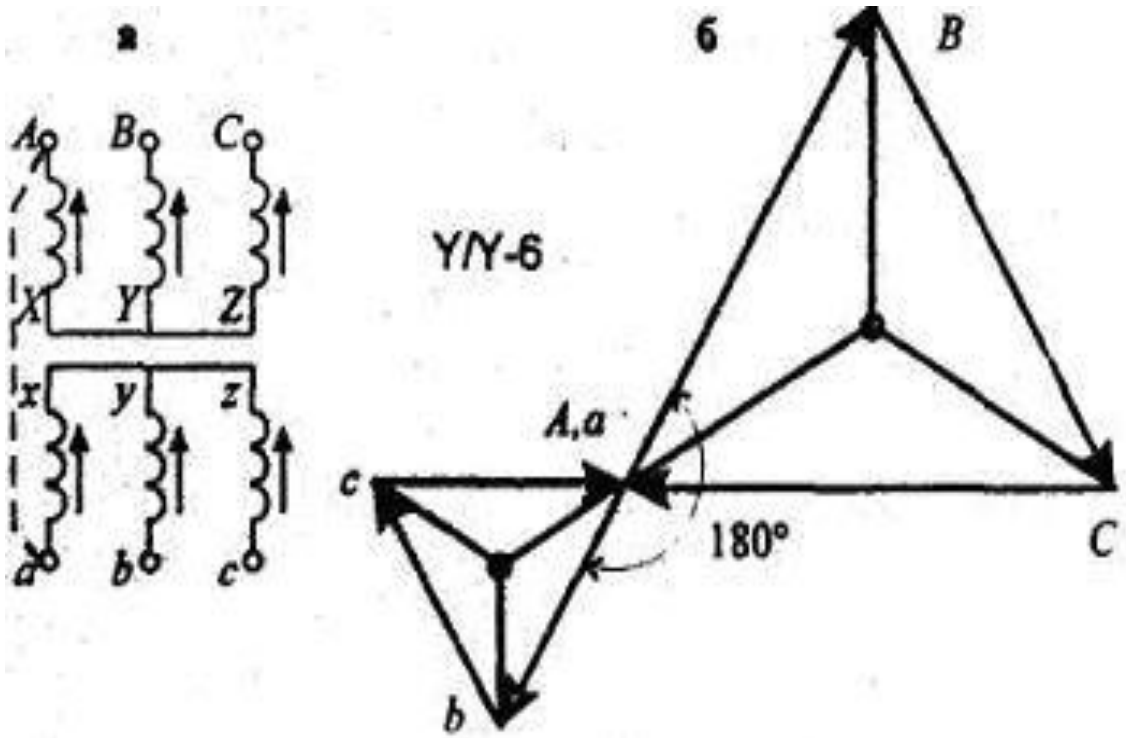


Рис. 5

Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

- На рис. 6 представлена схема, в которой по сравнению со схемой рис. 4 выполнена круговая перемаркировка зажимов вторичной обмотки (a→b , b→c, c→a).
- При этом фазы соответствующих ЭДС вторичной обмотки сдвигаются на 120° и, следовательно, номер группы меняется на 4.

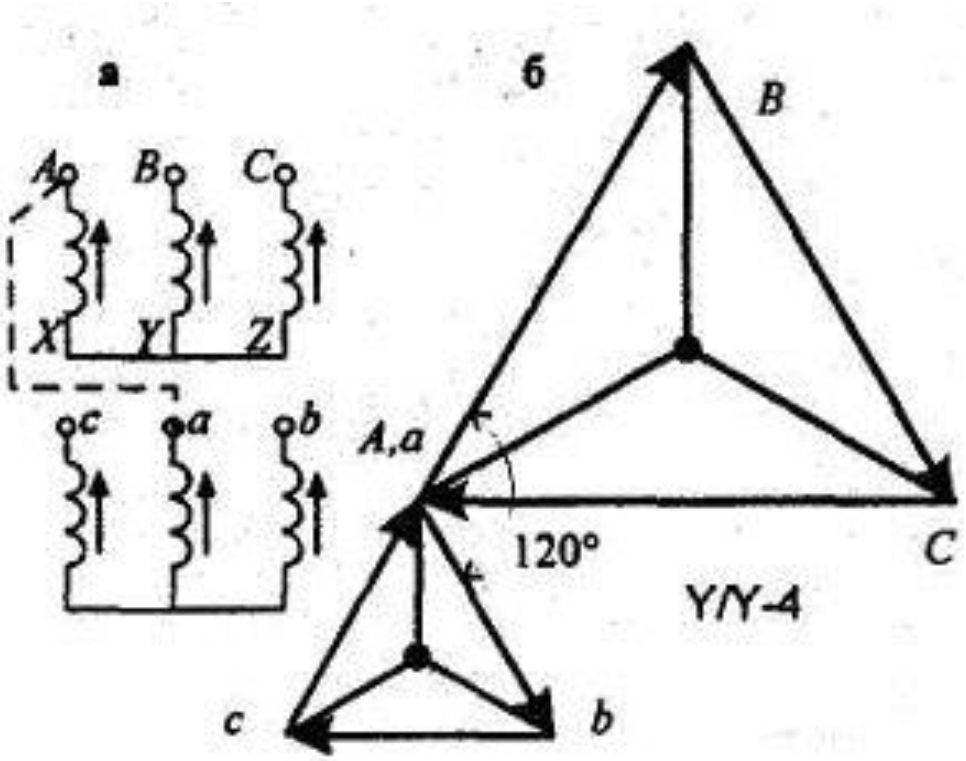


Рис. 6

Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

- Схемы соединений Y/Y позволяют получить четные номера групп, при соединении обмоток по схеме Y/Δ номера групп получаются нечетными.
- В качестве примера рассмотрим схему, представленную на рис. 7.
- В этой схеме фазные ЭДС вторичной обмотки совпадают с линейными, поэтому треугольник abc поворачивается на 30° против часовой стрелке по отношению к треугольнику ABC. Но так как угол между линейными напряжениями первичной и вторичной обмоток отсчитывается по часовой стрелке, то группа будет иметь *номер 11*.

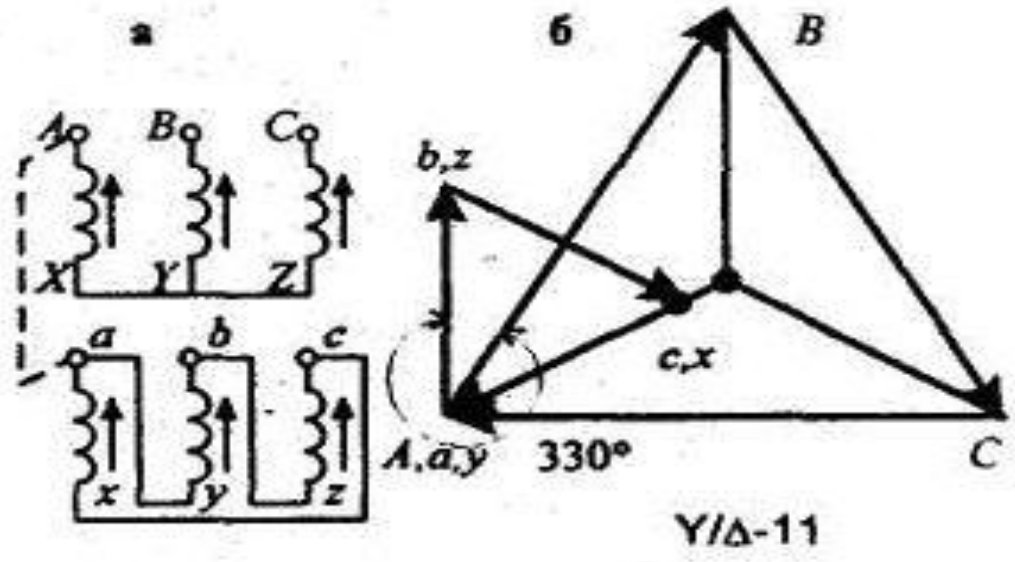
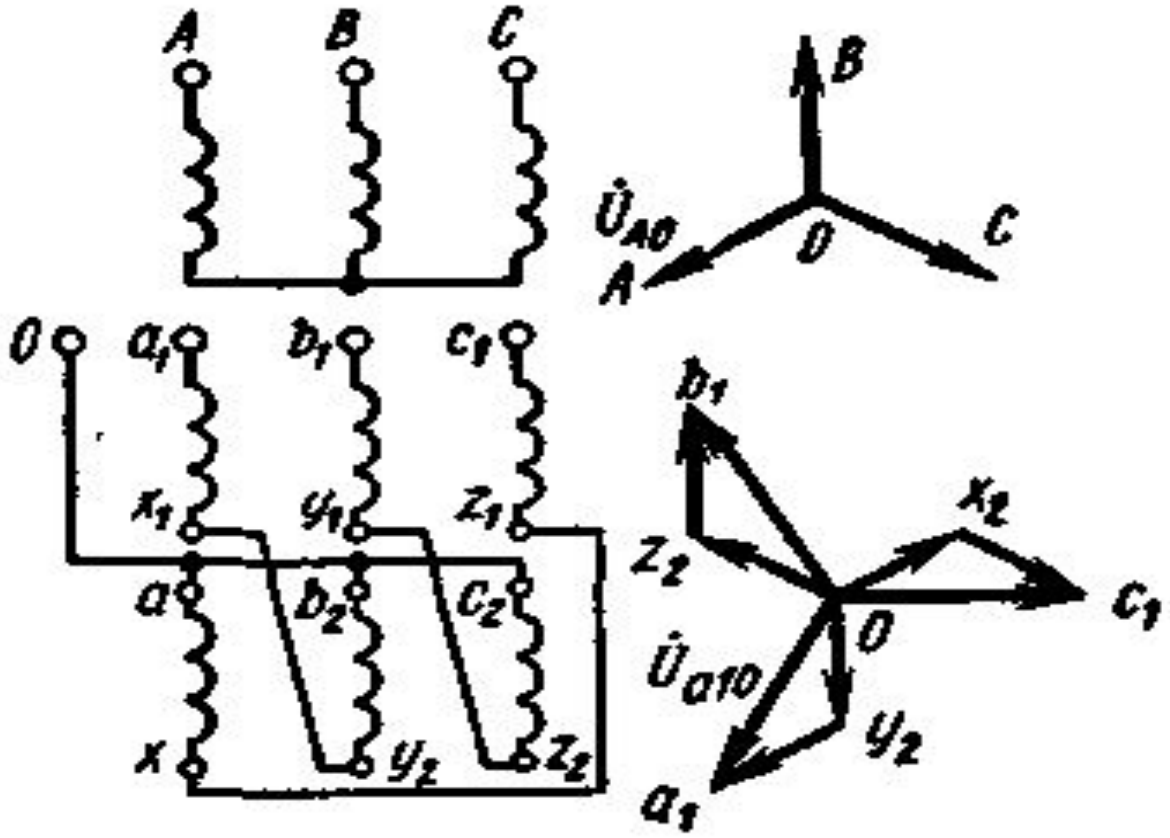


Рис. 7

- Из двенадцати возможных групп соединений обмоток трехфазных трансформаторов стандартизованы две: **Y/Y - 0 и Y/Δ-11**. Они, как правило, и применяются на практике.

Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

- При соединении обмотки НН по схеме $Z_{Н}$, а обмотки ВН по схеме У фазные напряжения обмотки НН сдвинуты относительно соответствующих фазных напряжений обмотки ВН (например, $\dot{U}_{a10}$ относительно $\dot{U}_{A0}$) на угол 330°, т. е. при таком соединении будет *одиннадцатая группа* (рис. 8).



- Рис. 8

Системы охлаждения трансформаторов

- Во время работы трансформатора в его обмотках, магнитной системе и некоторых других частях происходят потери энергии, выделяющиеся в виде тепла.
- При продолжительном режиме работы все выделяющееся тепло должно полностью отводиться в окружающую среду.
- В большинстве современных силовых трансформаторов отвод тепла от обмоток и магнитной системы осуществляется через теплоноситель - жидкий или газообразный диэлектрик, заполняющий бак, в котором установлен трансформатор (при газообразном диэлектрике бак должен быть герметичным).
- Воздушные сухие трансформаторы могут иметь защитный кожух, но не иметь бака.
- Основной изолирующей и охлаждающей средой в них служит свободно проникающий к активной части атмосферный воздух.
- При естественном воздушном охлаждении магнитопровод, обмотки и другие части трансформатора имеют непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, поэтому охлаждение их происходит путем конвекции воздуха и излучения.
- Сухие трансформаторы устанавливают внутри помещений (в зданиях, производственных цехах и пр.), при этом главным требованием является обеспечение пожарной безопасности.

Системы охлаждения сухих трансформаторов

- В эксплуатации они удобнее масляных, так как исключают необходимость периодической очистки и смены масла.
- Следует, однако, отметить, что воздух обладает меньшей электрической прочностью, чем трансформаторное масло, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных.
- Из-за меньшей теплопроводности воздуха по сравнению с маслом электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах меньше, чем в масляных, что приводит к увеличению сечения проводов обмотки и магнитопровода.
- Как следствие этого, масса активных частей (обмоток и магнитопровода) сухих трансформаторов больше, чем масляных.
- В настоящее время сухие трансформаторы имеют мощности до 10 МВА и напряжения обмотки ВН до 35 кВ.
- Их устанавливают только в сухих закрытых помещениях с относительной влажностью воздуха до 80% во избежание чрезмерного увлажнения обмоток.

Системы охлаждения сухих трансформаторов

- Сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением могут иметь **открытое (С), защищенное (СЗ) или герметизированное (СГ) исполнение.**
- Трансформаторы типа **СЗ** закрывают защитным кожухом с отверстиями, а типа СГ— герметическим кожухом.
- Для повышения интенсивности охлаждения применяют обдув обмоток и магнитопровода потоком воздуха от вентилятора. *Сухие трансформаторы с воздушным дутьем имеют условное обозначение* **СД.**
- Трансформаторы малой мощности выполняют, как правило, с охлаждением типа С.
- В некоторых случаях их помещают в корпус, залитый *термореактивными компаундами на основе эпоксидных смол* или других подобных материалов.
- Такие компаунды обладают высокими электроизоляционными и влагозащитными свойствами.
- После затвердевания они не расплавляются при повышенных температурах и обеспечивают надежную защиту трансформатора от механических и атмосферных воздействий.

Сухие трансформаторы с эпоксидным компаундом

- ***ТСЗГЛ , ТСЗГЛФ*** – трехфазные сухие трансформаторы с геафоливой литой изоляцией, класс нагревостойкости изоляции – F (***геафоль*** – эпоксидный компаунд с кварцевым наполнителем):
- ***ТСЗГЛ*** – вводы ВН внутри кожуха;
- ***ТСЗГЛФ*** – вводы ВН выведены на фланец, расположенный на торцевой поверхности кожуха

Преимущества трансформаторов с геафолевой изоляцией

- Геафоль не оказывает вредного влияния на окружающую среду, т.к. не выделяет никаких токсичных газов (даже под воздействием дуговых разрядов с высокой концентрацией энергии), т.е. обеспечивается полная экологическая безопасность.
- Обмотки трансформаторов пожаробезопасны, влагостойки, не требуют технического обслуживания.
- Имеют высокую стойкость к механическим усилиям, возникающим в режиме КЗ.
- Низкий уровень шума трансформаторов - за счет изготовления магнитопровода с шихтовкой по схеме «Step-lap» (***пятиступенчатый косой сплошной стык***).
- Применение трансформаторов типов ТСГЛ, ТСЗГЛ, ТСЗГЛФ позволяет потребителям:

 экономить средства на сооружении электросетей за счет глубокого ввода в здания;

 избежать издержек, связанных со строительством отдельно стоящих подстанций;

 улучшить архитектурный облик городов (экономить при этом дорогостоящую городскую территорию);

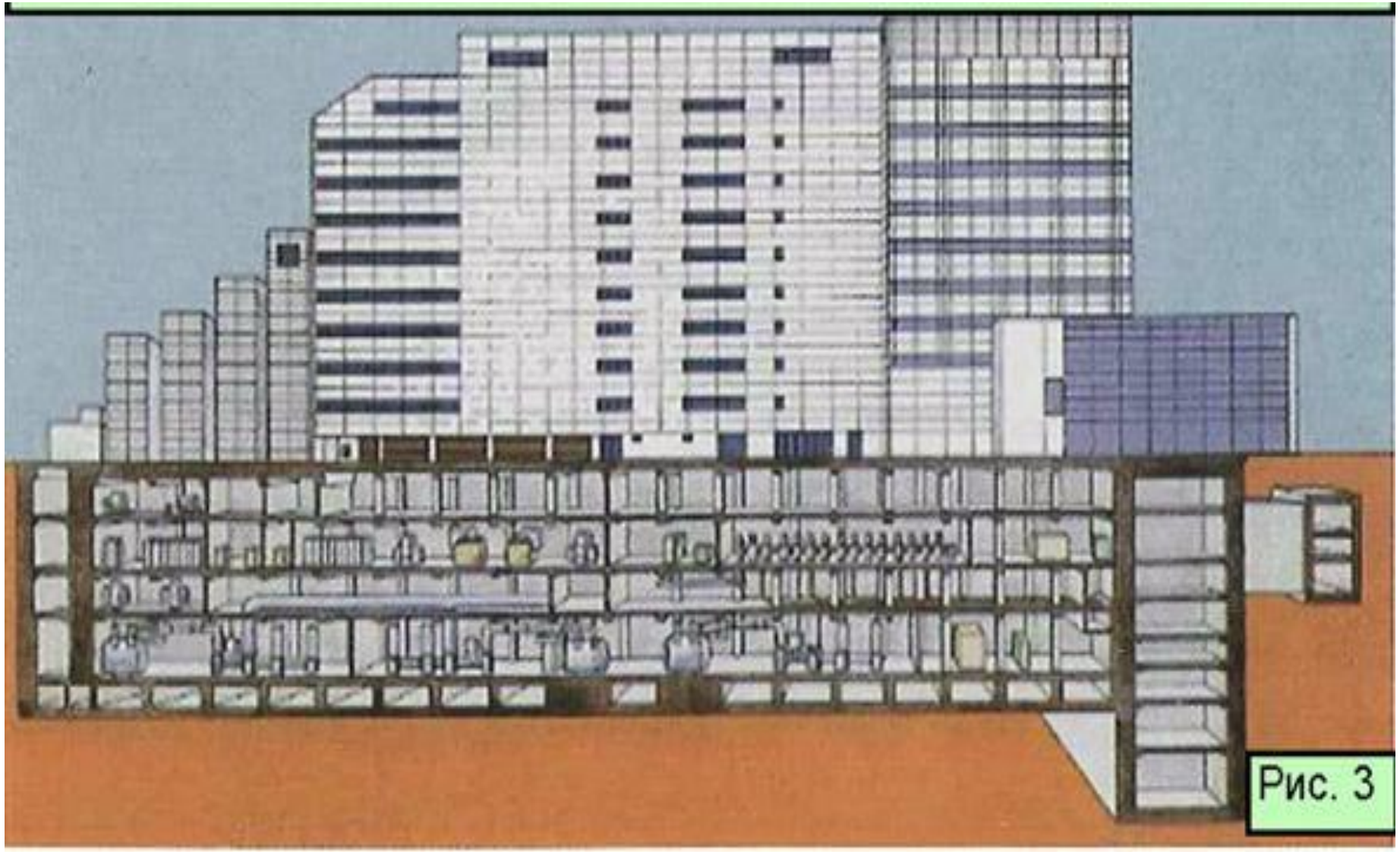
 снизить затраты на проведение раскопок в городах.

- Для защиты от перегрева трансформаторы комплектуются двухуровневым реле тепловой защиты, управляемым термисторами, встроенным в обмотки.

Сухие элегазовые трансформаторы

- К сухим относятся также и герметичные трансформаторы, баки которых заполнены газом, являющимся изолирующей средой и теплоносителем.
- Такие трансформаторы, например, заполненные газообразной шестифтористой серой (элегазом), при форсированном движении теплоносителя в баке, могут иметь по сравнению с масляными меньшую общую массу и являются пожаробезопасными.

Подземная подстанция в здании делового комплекса



Трансформаторы с масляным охлаждением

- В трансформаторах с естественным масляным охлаждением (**М**) магнитопровод с обмотками погружают в бак, наполненный тщательно очищенным минеральным (трансформаторным) маслом.
- Трансформаторное масло обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух, и хорошо отводит тепло от обмоток и магнитопровода трансформатора к стенкам бака, имеющего большую площадь охлаждения, чем трансформатор.
- Погружение трансформатора в бак со специальным маслом обеспечивает также повышение электрической прочности изоляции его обмоток и предотвращает ее увлажнение и потерю изоляционных свойств под влиянием атмосферных воздействий.
- При правильной эксплуатации масляных трансформаторов, когда **температура** изоляции в наиболее нагретом месте **не превышает 105 °С**, трансформатор может **служить 20—25 лет.**
- *Повышение температуры на **8 °С** приводит к сокращению срока службы трансформатора примерно в **два раза**.*

Трансформаторы с масляным охлаждением

- В трансформаторах мощностью **20—30 кВА** выделяется сравнительно небольшое количество теплоты, поэтому их баки имеют **гладкие стенки**.
- У более мощных трансформаторов (**20—1800 кВА**) поверхность охлаждения бака искусственно увеличивают, применяя ***ребристые или волнистые стенки*** либо окружая бак системой труб, в которых масло циркулирует за счет конвекции.
- Для повышения интенсивности охлаждения в трансформаторах мощностью **более 1800 кВА** к баку пристраивают навесные трубчатые теплообменники (**радиаторы**), которые с помощью патрубков с фланцами сообщаются с внутренней полостью бака.
- В радиаторе происходит усиленная циркуляция масла и интенсивное охлаждение.
- Масляные трансформаторы типа **М** применяют для мощностей **10—10000 кВА**.
- Трансформаторы мощностью **10000—63000 кВА** выполняют обычно с дутьем (**тип Д**).
- В этом случае теплоотдача с поверхности радиаторов форсируется путем обдува их вентиляторами.
- Каждый радиатор обдувается двумя вентиляторами, при этом ***теплоотдача увеличивается в 1,5 —1,6 раза.***

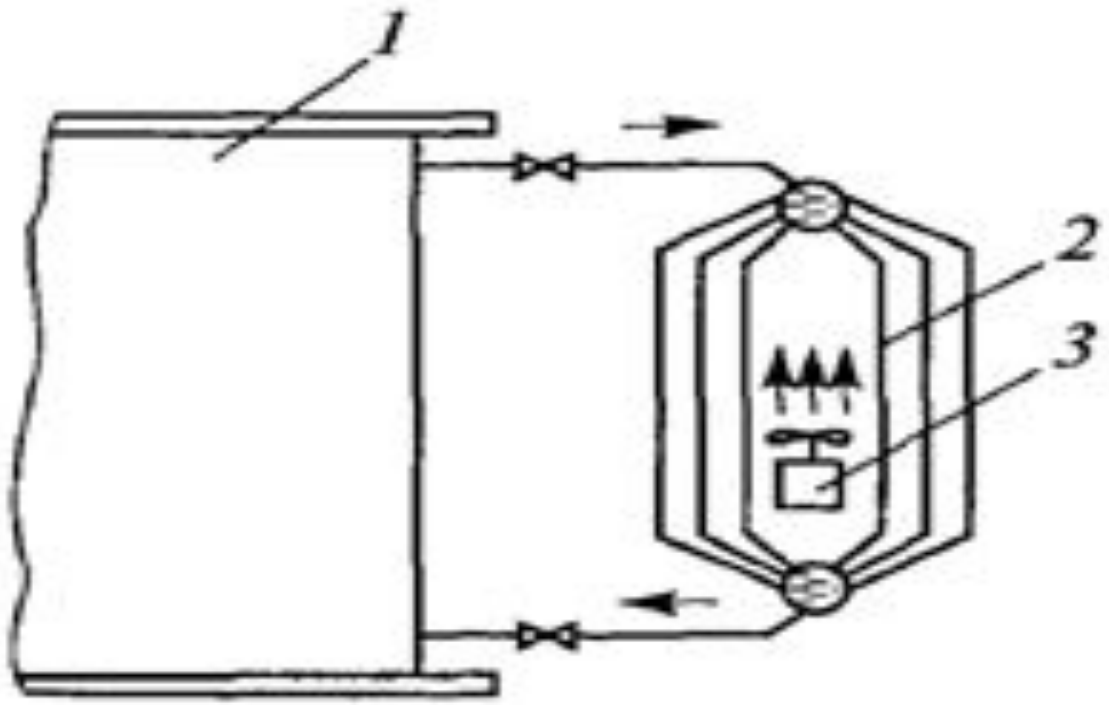
Маркировка систем охлаждения масляных трансформаторов

Естественная циркуляция воздуха и масла	М	ONAN
Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла	Д	ONAF
Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла	МЦ	OFAN
Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла	НМЦ	ODAN
Принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла	ДЦ	OFAF
Принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла	НДЦ	ODAF
Принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла	Ц	OFWF
Принудительная циркуляция воды и масла с направленным потоком масла	НЦ	ODWF

Система охлаждения М

Система охлаждения Д

Принципиальная схема охладителя системы Д

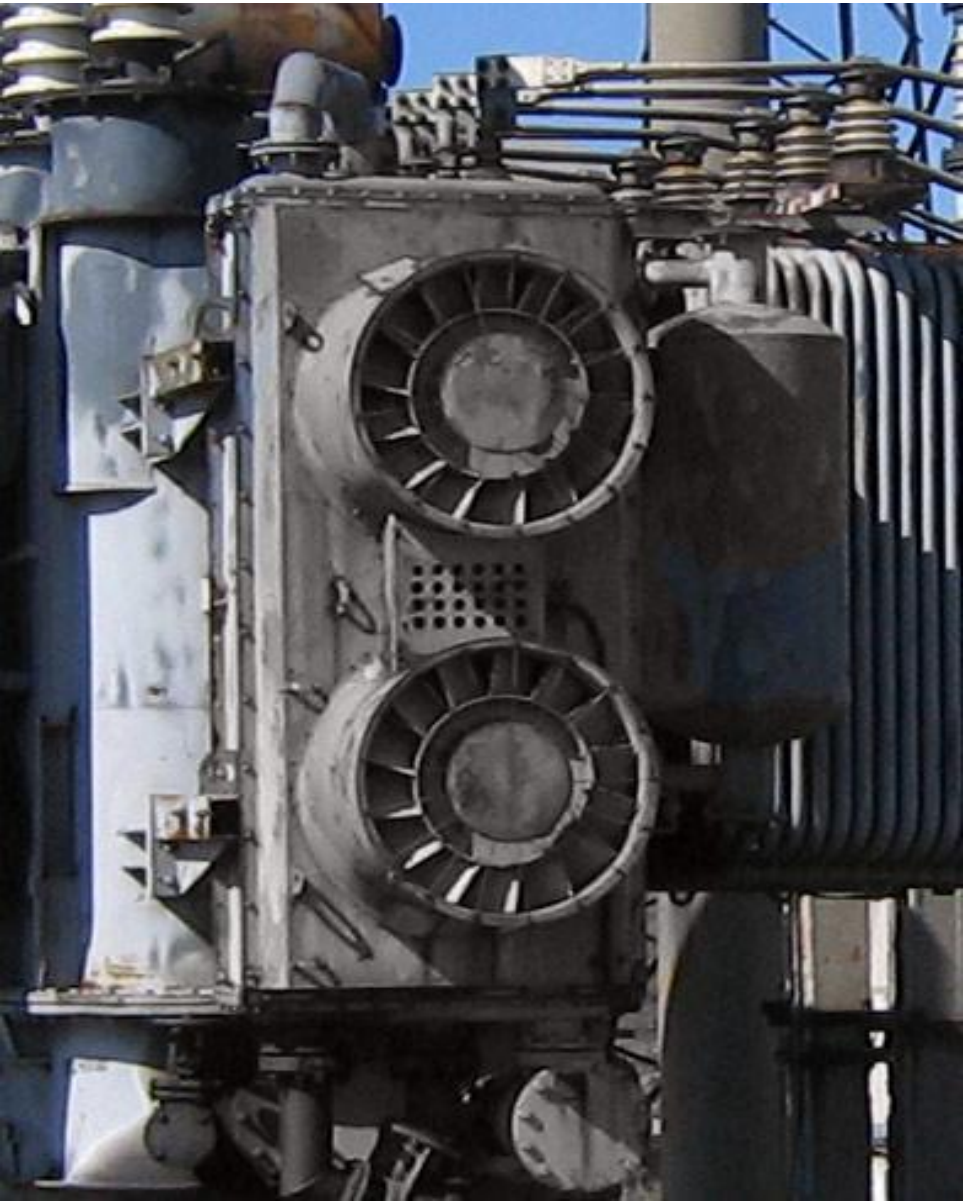


1 — бак трансформатора; *2* — радиаторы охладителя; *3* — вентилятор обдува

Система охлаждения Д

- *Масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла* (Д) применяется для более мощных трансформаторов, чем система охлаждения М.
- В этом случае в навесных охладителях из радиаторных труб помещают вентиляторы.
- Вентилятор засасывает воздух снизу и обдувает нагретую верхнюю часть труб.
- Пуск и останов вентиляторов осуществляется автоматически в зависимости от нагрузки и температуры нагрева масла.
- Трансформаторы с таким охлаждением могут работать при полностью отключенном дутье, если **нагрузка не превышает 100 % от номинальной**, а температура верхних слоев масла не более 55 °С, а также независимо от нагрузки при отрицательных температурах окружающего воздуха и температуре масла не выше 45 °С (**ПТЭ ЭП**).
- *Максимально допустимая температура масла в верхних слоях при работе трансформатора с номинальной нагрузкой 95 °С.*
- Форсированный обдув радиаторных труб улучшает условия охлаждения масла, а следовательно, обмоток и магнитопровода трансформатора, что позволяет изготовлять такие трансформаторы мощностью до 80 000 кВА.

Система охлаждения ДЦ

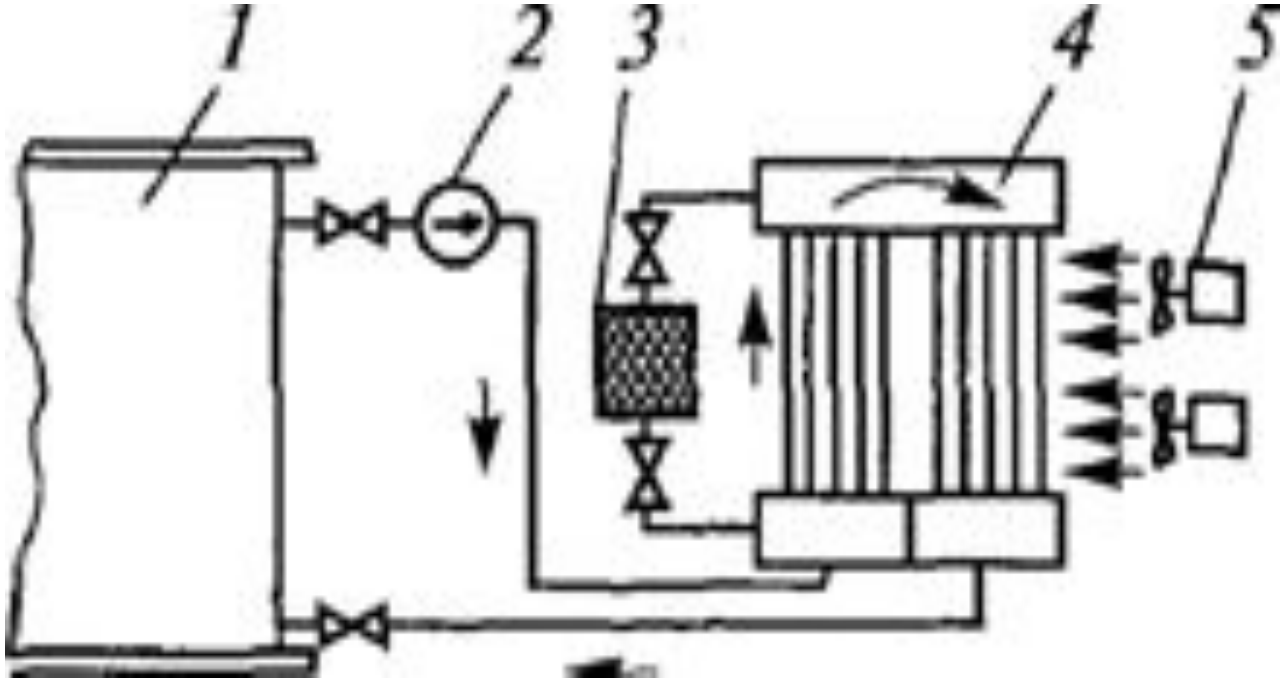


В трансформаторах мощностью около **100 МВА** и более выделяющиеся потери настолько значительны, что для их отвода приходится применять специальные масляно-воздушные охладители, обдуваемые вентиляторами и оснащенные насосами для принудительной циркуляции масла.

Для увеличения эффективности обдува трубы в таких охладителях имеют сильно развитую ребристую наружную поверхность.

Благодаря принудительной циркуляции масла достигается более равномерное распределение температуры масла по высоте бака.

Принципиальная схема охладителя системы ДЦ



1 — бак трансформатора; *2* — масляный электронасос; *3* — адсорбционный фильтр; *4* — охладитель; *5* — вентилятор обдува

Система охлаждения ДЦ

- *Масляное охлаждение с дутьем и принудительной циркуляцией масла* через воздушные охладители (ДЦ) применяется для трансформаторов мощностью **63000 кВА и выше.**
- Охладители состоят из тонких ребристых трубок, обдуваемых снаружи вентилятором.
- Электронасосы, встроенные в маслопроводы, создают непрерывную принудительную циркуляцию масла через охладители.
- Благодаря высокой скорости циркуляции масла, большой поверхности охлаждения и интенсивному дутью охладители обладают большой теплоотдачей и компактностью.
- Такая система охлаждения позволяет значительно уменьшить габаритные размеры трансформаторов.
- Охладители могут устанавливаться вместе с трансформатором на одном фундаменте или на отдельных фундаментах рядом с баком трансформатора.

Система охлаждения Ц

Система Ц – принудительная циркуляция воды и масла.

Эта очень эффективная и компактная система охлаждения применяется для мощных трансформаторов тогда, когда имеется достаточное количество воды (гидростанции, очень мощные тепловые станции).

Она позволяет отказаться от системы охлаждения ДЦ, которая при очень большой мощности трансформаторов становится достаточно громоздкой.

Эта система охлаждения основана на применении масляно-водяных охладителей с гладкими или оребренными трубами и движением воды по трубам, а масла — в межтрубном пространстве. При отключении этой системы охлаждения, как и при системе **ДЦ**, трансформаторы могут оставать-ся в работе также очень ограниченное время.

Система охлаждения МЦ

- *Естественная циркуляция воздуха и принудительная масла.*
- Эта система охлаждения в отечественной промышленности применяется редко
- При такой системе благодаря принудительной циркуляции масла с помощью насоса достигается более равномерное распределение температуры масла по высоте бака трансформатора и снижение температуры верхних слоев масла.

Система охлаждения МВ

- В отечественном трансформаторостроении эта система охлаждения также не получила широкого распространения.
- Для охлаждения масла используется вода, циркулирующая в трубах, размещенных в верхней части бака, в зоне наиболее горячего масла.
- Вода прогоняется по трубам с помощью насосов.

Системы охлаждения с направленной циркуляцией масла в обмотках НДЦ и НЦ

- Улучшить охлаждение обмоток и обеспечить при этом более равномерное распределение в них температуры можно путем создания принудительной (направленной) циркуляции масла в охлаждающих каналах обмоток с требуемой скоростью, обеспечивающей необходимый температурный режим.
- Здесь возможны два варианта исполнения — с одноконтурной и двухконтурной схемами циркуляции масла.
- В первом варианте масло, забираемое из верхней части бака, проходит через масляно-воздушные или масляноводяные охладители и подается в обмотки.
- Во втором варианте кроме контуров охлаждения масла, аналогичных системам ДЦ или Ц, существуют независимые контуры охлаждения обмоток, причем масло, забираемое насосом из верхней части бака, подается, минуя охладители, в нижнюю часть бака и далее в контуры охлаждения обмоток.
- Второй вариант исполнения системы охлаждения несколько сложнее и дороже.
- Эта система охлаждения позволяет при необходимости (например, в трансформаторах предельных мощностей) повысить электромагнитные нагрузки, но она усложняет конструкцию изоляции и обмоток, а также технологию сборки и испытаний трансформаторов (необходимы гидравлические испытания контуров циркуляции масла в обмотке).
- Поэтому такие системы применяются в отечественном трансформаторостроении для трансформаторов мощностью **400 МВА и выше**.

Масляные герметичные трансформаторы

- ***ТМГ*** – трехфазный масляный герметичный трансформатор;
- ***ТМГМШ*** – трехфазный масляный герметичный трансформатор **малошумные;**
- ***ТМГСУ*** – трехфазный масляный герметичный с ***симметрирующим*** устройством трансформатор, обеспечивающий поддержание симметричности фазных напряжений в сетях потребителей с неравномерной пофазной нагрузкой.

Преимущества герметичных трансформаторов

- Трансформаторы изготавливаются в герметичном исполнении с **полным заполнением маслом**, без расширителя и без воздушной или газовой подушки.
- Контакт масла с окружающей средой **полностью отсутствует**, что исключает **увлажнение, окисление и шламообразование масла.**
- Перед заливкой масло **дегазируется**, заливка его в бак производится в специальной вакуумзаливочной камере при глубоком вакууме, что обеспечивает удаление из масла растворенного в нем воздуха, удаление из изоляции воздушных включений, тем самым **предотвращается окисление масла**, обеспечивается **высокая электрическая прочность изоляции** трансформатора.

- Масло в трансформаторах ***практически не меняет своих свойств*** в течение всего срока службы трансформатора.
- **Исключается необходимость проведения испытаний масла** трансформатора ТМГ как при его хранении, так и при вводе в эксплуатацию и в процессе эксплуатации

*("... **Из герметизированных трансформаторов проба масла не отбирается." Правила устройства электроустановок. Седьмое издание. Москва, 2003. Глава 1.8.16, п. 13).***

- **Не требуется** проведение профилактических, текущих и капитальных **ремонтов** в течение всего срока эксплуатации трансформатора (**25 лет**).

- Силовые трансформаторы типа ТМГСУ выпускаются с гофрированным баком и симметрирующим устройством, которое обеспечивает равномерное распределение напряжения по фазам даже при несимметричной нагрузке.
- Трансформаторы ТМГСУ со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$ и специальным симметрирующим устройством (СУ) являются самыми экономичными для **четырехпроводных сетей 0,38 кВ с однофазной или смешанной нагрузкой**.
- В этих трансформаторах отсутствует явление перегрева токами нулевой последовательности при неравномерной нагрузке фаз и при ее суммарной мощности, равной или ниже номинальной.
- СУ улучшает синусоидальность формы кривой напряжения при наличии в сети нелинейных нагрузок (сварочных агрегатов, люминесцентных ламп и др.), что важно при питании таких чувствительных к качеству электроэнергии устройств, как компьютеры, телевизоры и другие электронные устройства.
- СУ уменьшает шум у трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Yн при их неравномерной загрузке по фазам, что важно при установке их в жилые здания.

- Силовые трансформаторы типа ***ТМГМШ*** предназначены для потребителей с **повышенными требованиями к уровню шума**:

- **жилые дома;**
- **больницы;**
- **общественные здания и др.**

- а также в местах с особыми требованиями по экологии.
- Кроме того, трансформаторы типа **ТМГМШ являются энергосберегающими**, у них сниженные по сравнению с трансформаторами ТМГ **потери холостого хода**.

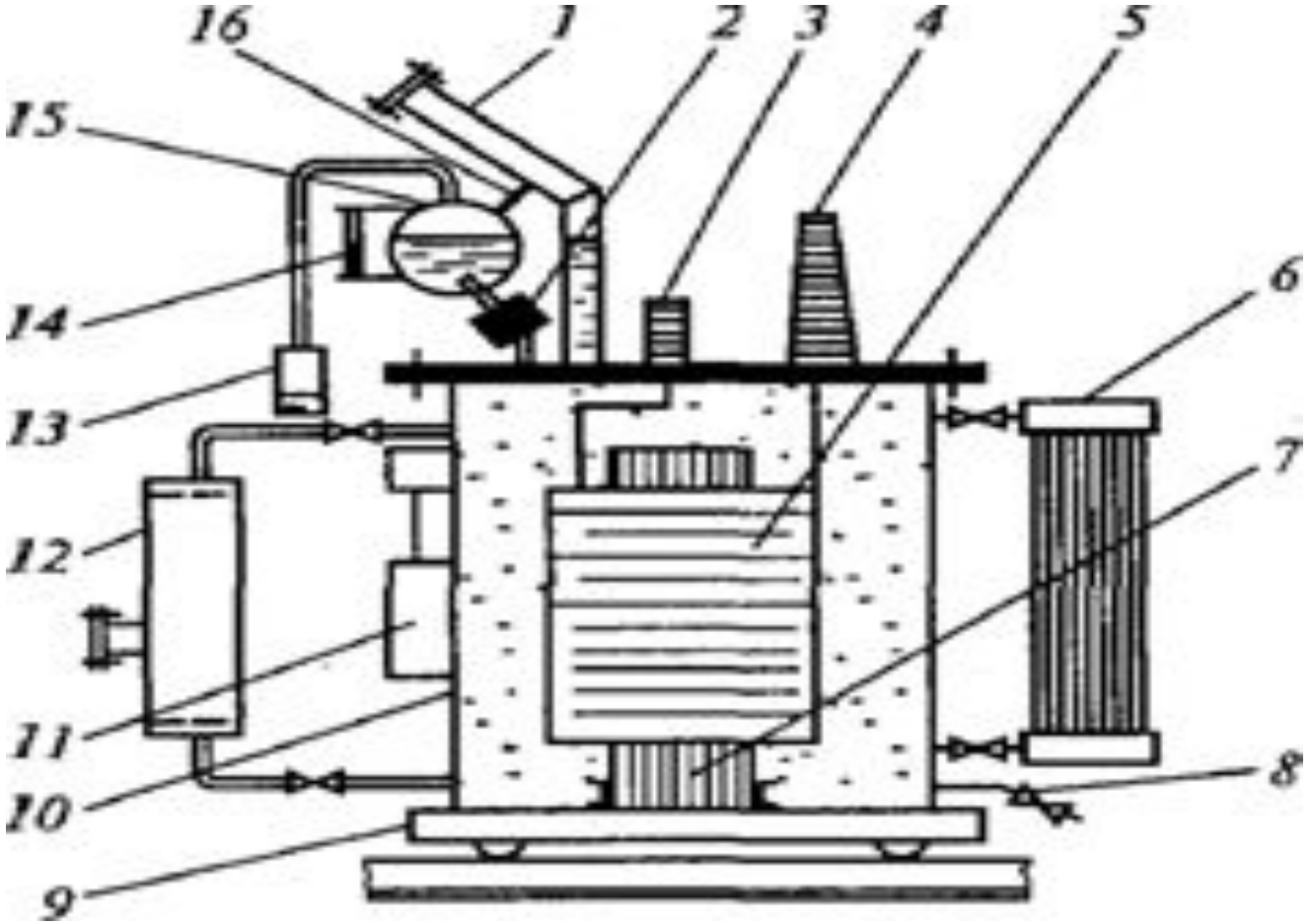
Трансформатор ТМГ-СЭЩ-35/0.4

- **Силовой трансформатор ТМГ-СЭЩ** предназначен для работы в электросетях напряжением до 35 кВ.
- Чтобы снизить потери при передаче электроэнергии, было решено применить систему понижения напряжения с 35 сразу до 0,4 кВ, **минуя среднее значение 6 или 10 кВ.**
- Для удобства использования городскими сетями, трансформатор обладает уменьшенными габаритными размерами и пониженным уровнем шума за счет шихтовки по методу STEP LAP.
- Эта технология шихтовки с применением лучшей электротехнической стали, позволила минимизировать потери в магнитопроводе.

Шихтовка магнитопровода по специальной системе **Step-lap**

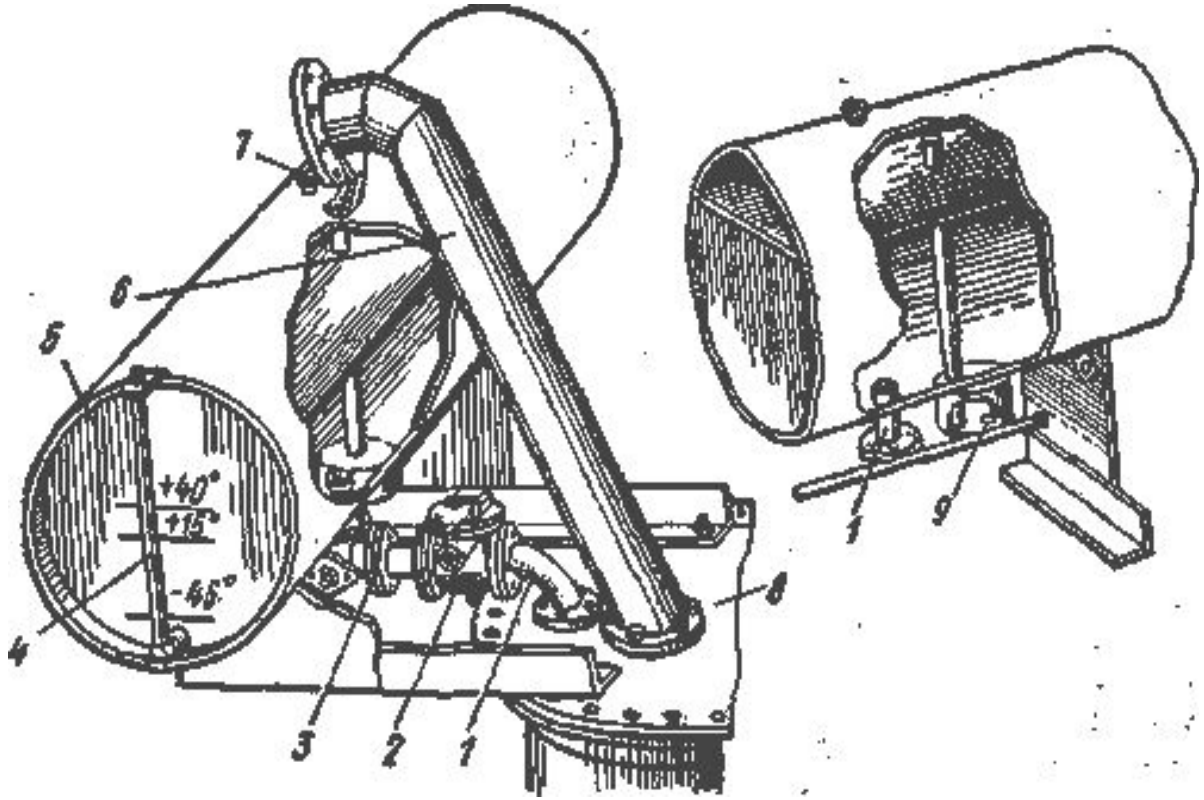
- Магнитопроводы трансформаторов изготавливаются из пластин, получаемых на линии поперечного раскроя электротехнической стали "Lae" (Италия).
- Это современное технологическое оборудование позволяет производить шихтовку магнитопроводов с косым стыком пластин по так называемой схеме «Step-lap», что резко повышает качество изготовления магнитопроводов.
- При использовании метода сборки магнитных систем « Step-lap» места стыка листов смещаются относительно друг друга на одно и то же расстояние, на 3, 5, 7 или больше шагов.
- При шаге 7 поперечное сечение в области стыка уменьшается только на 14%, т. е. только через 8 листов места стыка становятся параллельными.
- Таким образом, практически весь магнитный поток может протекать без искажения в области воздушного зазора по соседним листам и как следствие приводит к снижению плотности магнитного потока и потерь в угловом участке по сравнению с традиционными методами сборки.

Конструктивная схема масляного трансформатора



1 — выхлопная труба; *2* — газовое реле; *3* — ввод НН; *4*— ввод ВН; *5*— обмотки высшего и низшего напряжений; *6* — радиаторы системы охлаждения; 7 — магнитопровод; *8*— кран для слива масла; *9* — тележка с катками; *10* — бак; *11* — устройство регулирования напряженмя под нагрузкой (РПН); *12* — термосифонный фильтр; *13* —воздухо-осушитель; *14* — указатель уровня масла; *15*— расширитель; *16* — соединительная трубка

Конструктивные элементы масляных трансформаторов



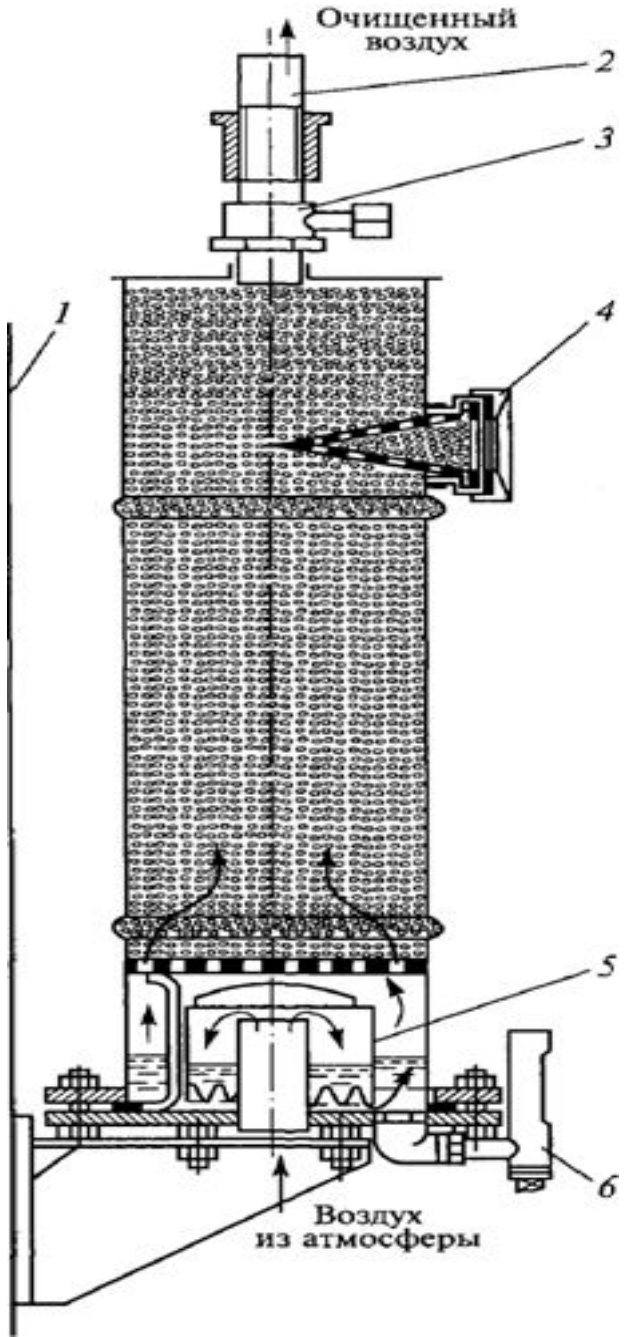
Установка расширителя и выхлопной трубы:
1 — маслопровод; *2* — газовое реле; *3* — кран для отсоединения расширителя; *4* —указатель уровня масла; 5 — расширитель; *6* —выхлопная труба; *7* — пробка для заливки масла; *8* —бак трансформатора; *9* — отстойник

Расширитель трансформатора представляет собой цилиндрический сосуд, соединенный с баком трубопроводом и служащий для уменьшения площади соприкосновения масла с воздухом.

Объем расширителя составляет 9...10% от объема масла в трансформаторе и системе охлаждения.

Бак трансформатора полностью залит маслом, изменение объема которого при нагреве и охлаждении приводит к колебанию уровня масла в расширителе, при этом воздух вытесняется из расширителя или всасывается в него.

Воздухоосушитель



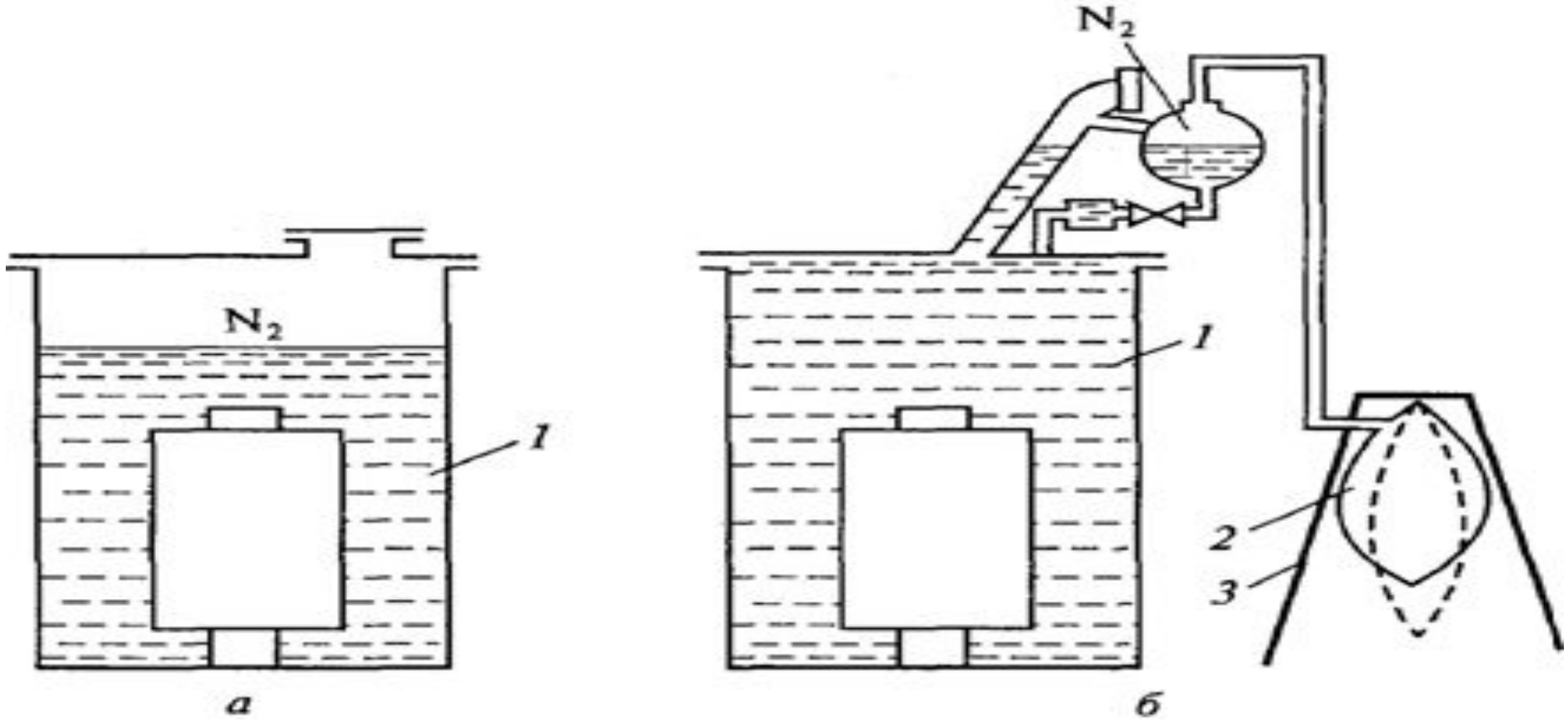
1 — стенка бака; *2* — труба для присоединения воздухоосушителя; *3* — соединительная гайка; *4*— смотровое окно патрона с индикаторным силикагелем; 5 — масляный затвор; *6* — указатель уровня масла в затворе.

Масло очень гигроскопично, и если расширитель непосредственно связан с атмосферой, то влага из воздуха поступает в масло, резко снижая его изоляционные свойства. Для предотвращения этого расширитель связан с окружающей средой через ***силикагелевый воздухоосушитель.*** Силикагель поглощает влагу из всасываемого воздуха. Силикагелевый фильтр полностью не осушает воздух, поэтому постепенно влажность воздуха в расширителе повышается.

Для предотвращения этого применяют герметичные баки с *газовой подушкой из инертного газа* или свободное пространство в расширителе заполняют инертным газом (азотом), поступающим из специальных эластичных емкостей.

Возможно также применение специальной *пленки-мембраны в расширителе на границе масло — воздух* (**пленочная защита**).

Схемы конструктивного выполнения азотной защиты масла в трансформаторах



а — система с переменным давлением азота над поверхностью масла;

б — система с нормальным атмосферным давлением азота и эластичным резервуаром;

1 — бак трансформатора; *2* — эластичный резервуар; *3* — козлы для подвешивания резервуара

Выхлопная (предохранительная) труба

- *Выхлопная {предохранительная) труба* на крышке бака защищает его от разрыва при интенсивном выделении газа во время крупных повреждений внутри трансформатора (**короткого замыкания**).
- Верхний конец выхлопной трубы герметично закрывается диафрагмой из тонкого стекла или медной фольги.
- При интенсивном выделении газа, давление в баке трансформатора резко увеличивается, диафрагма разрушается, давление в баке понижается, что и предохраняет его от деформации.
- Верхняя полость выхлопной трубы и воздушное пространство над поверхностью масла в расширителе соединены трубкой.
- Это необходимо для выравнивания давлений с обеих сторон диафрагмы при изменении объема масла в нормальных эксплуатационных условиях.
- Вместо выхлопной трубы в настоящее время находят применение механические *пружинные предохранительные клапаны*, устанавливаемые на верхней части стенки трансформатора.
- Клапан срабатывает при повышении давления в баке **до 80 кПа** и закрывается при давлении ниже **35 кПа.**

Маслоуказатель

- *Маслоуказатель* служит для контроля уровня масла в трансформаторе.
- Применяются плоские и трубчатые стеклянные маслоуказатели, работающие по принципу сообщающихся сосудов.
- На шкале маслоуказателя нанесены три контрольные риски, соответствующие уровням масла в неработающем трансформаторе при температурах **-45, +15 и +40** °С .
- В корпус маслоуказателя встроен также специальный герметичный контакт (геркон), подающий сигнал в случае недопустимого понижения уровня масла в трансформаторе.

Термосифонный фильтр

- ***Термосифонный фильтр*** крепится к баку трансформатора и заполняется силикагелем или другим веществом, поглощающим продукты окисления масла.
- При циркуляции за счет разности плотностей горячего и холодного масла происходит ***непрерывная*** его ***регенерация***.
- **Адсорбентом** может служить как силикагель, так и активный оксид алюминия, алюмагель и др.
- Адсорбенты удерживают воду в своих порах, не вступая с ней в химическое соединение.
- Насыщенный водой адсорбент заменяется, а использованный регенерируется нагреванием до определенной температуры (400... 500 °С).
- Для индикации насыщения силикагеля влагой в него добавляют хлористый кобальт (около 3%).
- Примесь хлористого кобальта придает составу **голубую окраску**. Появление **розовой окраски** является признаком насыщения состава водой.
- Количество адсорбента, засыпаемого в термосифонный фильтр трансформатора, составляет около 1 % залитого в него масла.
- Для предупреждения окисления масла кроме фильтров и азотной защиты применяются ***антиокислительные присадки***, способствующие поддержанию качества масла длительное время и защищающие другие изоляционные материалы трансформатора.

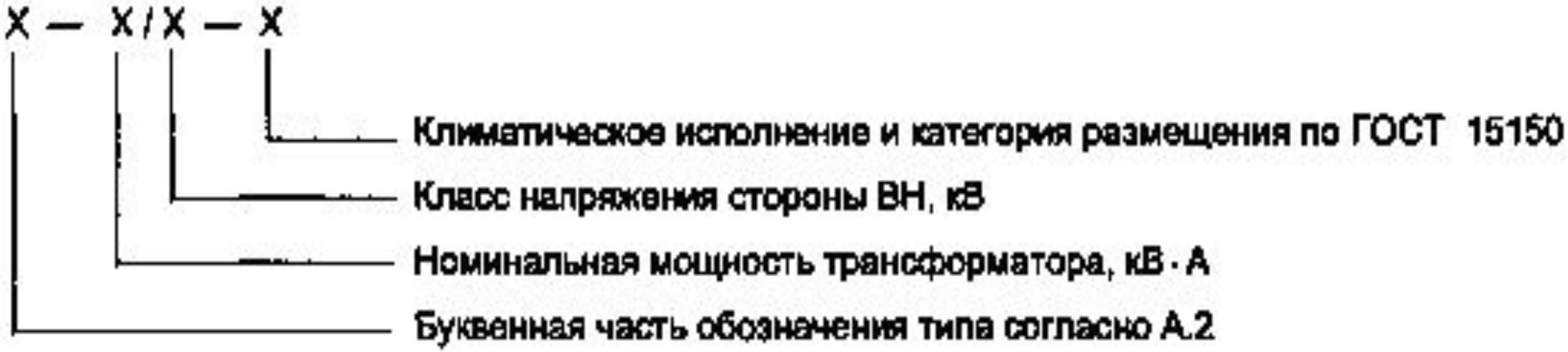
Климатическое исполнение трансформаторов

Климатические исполнения изделий	Обозначения*		
	буквенные		цифровые
	русские	латинские	
Изделия, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах			
Для макроклиматического района с умеренным климатом**	**У**	**(N)**	**0**
Для макроклиматических районов с умеренным и холодным климатом**	**УХЛ****	**(NF)**	**1**
Для макроклиматического района с влажным тропическим климатом***	**ТВ**	**(TH)**	**2**
Для макроклиматического района с сухим тропическим климатом***	**ТС**	**(TA)**	**3**
Для макроклиматических районов как с сухим, так и с влажным тропическим климатом***	**Т**	**(T)**	**4**
Для всех макроклиматических районов на суше, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)	**О**	**(U)**	**5**
Изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом			
Для макроклиматического района с умеренно-холодным морским климатом	**М**	**(M)**	**6**
Для макроклиматического района с тропическим морским климатом, в том числе для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в этом районе	**ТМ**	**(MT)**	**7**
Для макроклиматических районов как с умеренно-холодным, так и тропическим морским климатом, в том числе для судов неограниченного района плавания	**ОМ**	**(MU)**	**8**
Изделия, предназначенные для эксплуатации во всех макроклиматических районах на суше и на море, кроме макроклиматического района с очень холодным климатом	**В**	**(W)**	**9**

Категория размещения трансформаторов

- 1 – наружные (открытые) электроустановки;
- 2 – наружные, под навесом;
- 3 – неотапливаемые помещения;
- 4 – отапливаемые помещения;
- 5 – размещения в шахтах (рудничное электрооборудование).

Условное обозначение трансформаторов



Буквенная часть должна соответствовать следующему порядку обозначений:

- **А - автотрансформатор;**
- **О или Т - однофазный или трехфазный трансформатор;**
- **Р - расщепленная обмотка НН;**
- **буквы условного обозначения видов охлаждения;**
- **З - трансформатор с естественным масляным охлаждением или с охлаждением негорючим жидким диэлектриком с защитой при помощи азотной подушки без расширителя;**
- **Л - трансформатор с литой изоляцией;**
- **Т - трехобмоточный трансформатор (для двухобмоточного трансформатора букву не указывают);**
- **Н - трансформатор РПН;**
- **С - трансформатор собственных нужд электростанций.**