

# Электротехника и электроника

Трансформаторы

# Трансформаторы

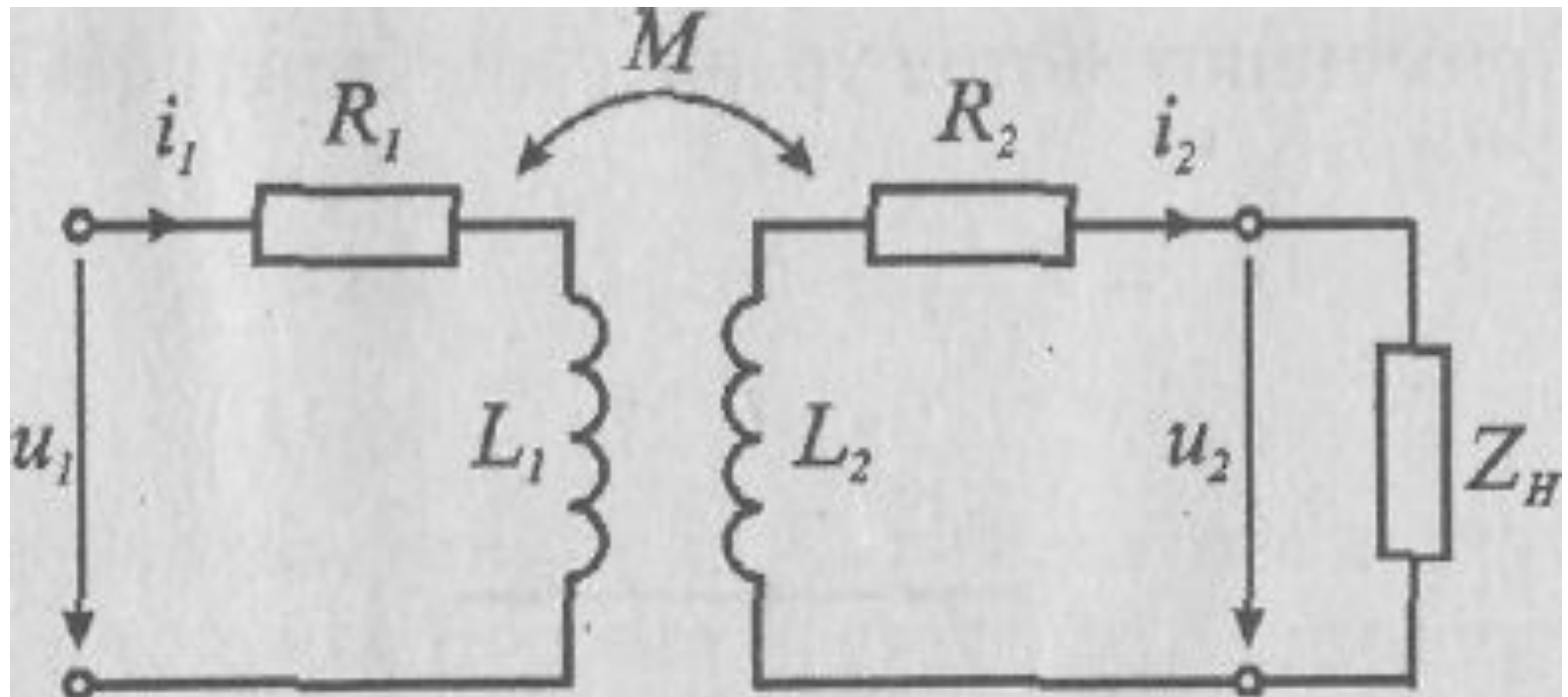
***Принцип действия  
трансформатора и его уравнения***

# *Определение трансформатора*

---

- *Трансформатор — это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.*

# Схема двухобмоточного трансформатора без магнитопровода



# Уравнения трансформатора

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt};$$

$$0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + u_2.$$

# Уравнения трансформатора в комплексной форме

---

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2;$$

$$0 = R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 + \dot{U}_2.$$

# *Режимы работы трансформатора*

---

- *Режим холостого хода:*

$$Z_H = \dots, U_2 = 0.$$

- *Режим короткого замыкания:*

$$Z_H = 0, U_2 = 0.$$

- *Режим нагрузки.*

# *Режим холостого хода*

- *Вторичная обмотка не оказывает влияния на физические процессы в первичной обмотке, при этом первичная обмотка эквивалентна цепи, состоящей из последовательно включенных  $R_1$  и  $L_1$ .*



# Уравнения трансформатора в режиме холостого хода

$$U_{1X} = R_1 \dot{I}_{1X} + j\omega L_1 \dot{I}_{1X};$$
$$0 = U_{2X} - j\omega M \dot{I}_{1X}.$$

# *Режим короткого замыкания*

- Так как ток  $I_{2к}$  во вторичной обмотке велик, то даже при малом входном напряжении  $U_{1к}$  ток в первичной обмотке  $I_{1к}$  достигает больших значений.
- Это может привести к перегреву или даже перегоранию одной из обмоток трансформатора.

# Уравнения трансформатора в режиме короткого замыкания

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1k} &= R_1 \dot{I}_{1k} + j\omega L_1 \dot{I}_{1k} - j\omega M \dot{I}_{2k}, \\ 0 &= R_2 \dot{I}_{2k} + j\omega L_2 \dot{I}_{2k} - j\omega M \dot{I}_{1k}. \end{aligned}$$

# Режим нагрузки

- Ток вторичной обмотки  $I_2$  оказывает существенное влияние на ток в первичной обмотке  $I_1$ . Это обусловлено встречным включением обмоток, при котором общий магнитный поток в первичной обмотке равен разности магнитных потоков, создаваемых в ней токами первичной и вторичной обмоток: магнитный поток от тока  $I_2$  уменьшает общий магнитный поток через первичную обмотку, а стало быть, уменьшает суммарную, индуцируемую в ней ЭДС, что приводит к увеличению тока  $I_1$  в ней до такой его величины, при которой ее суммарная ЭДС совместно с падением напряжения на активном сопротивлении и, уравновесят приложенное к первичной обмотке напряжение  $U_1$ .

# Уравнения для идеального трансформатора

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2;$$

$$\dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1 - j\omega L_2 \dot{I}_2.$$

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{n}.$$

$$\dot{U}_1 \dot{I}_1 = \dot{U}_2 \dot{I}_2,$$

# Виды трансформаторов

---

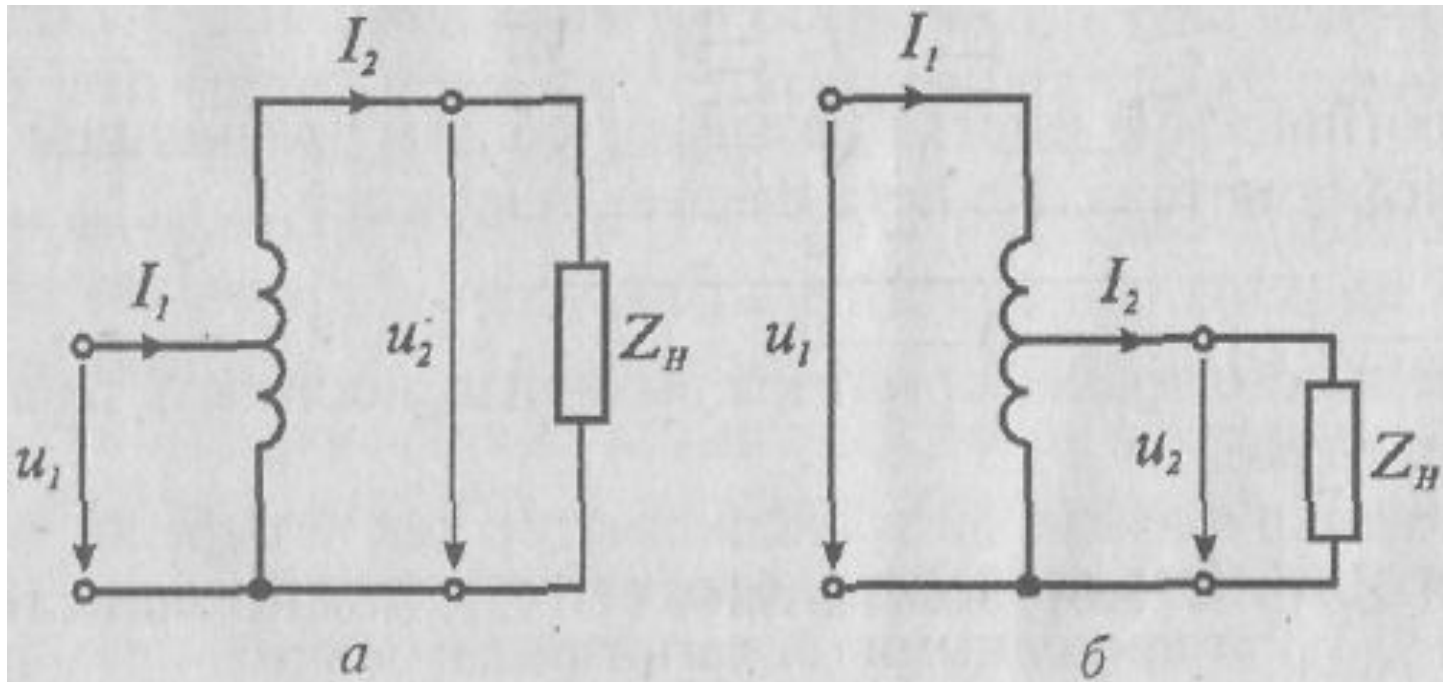
- Автортрансформаторы
- Однофазные трансформаторы
- Трехфазные трансформаторы
- Измерительные трансформаторы

# Автотрансформаторы

---

- Автотрансформатор — специальный тип трансформатора с одной обмоткой, часть которой принадлежит первичной и вторичной цепям.
- Автотрансформаторы могут быть повышающие и понижающие, однофазные, трехфазные, регулируемые и нерегулируемые.

# Повышающий и понижающий автотрансформаторы





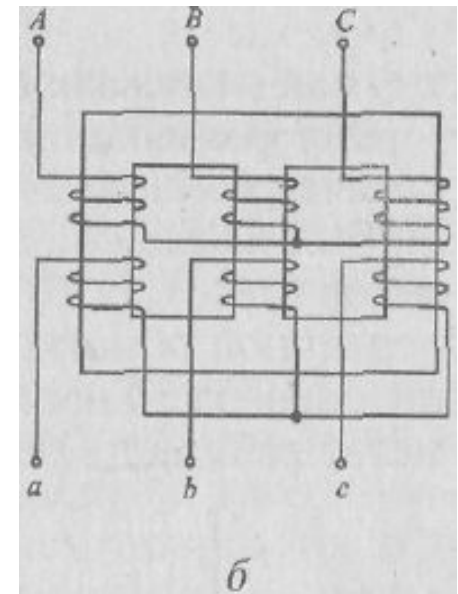
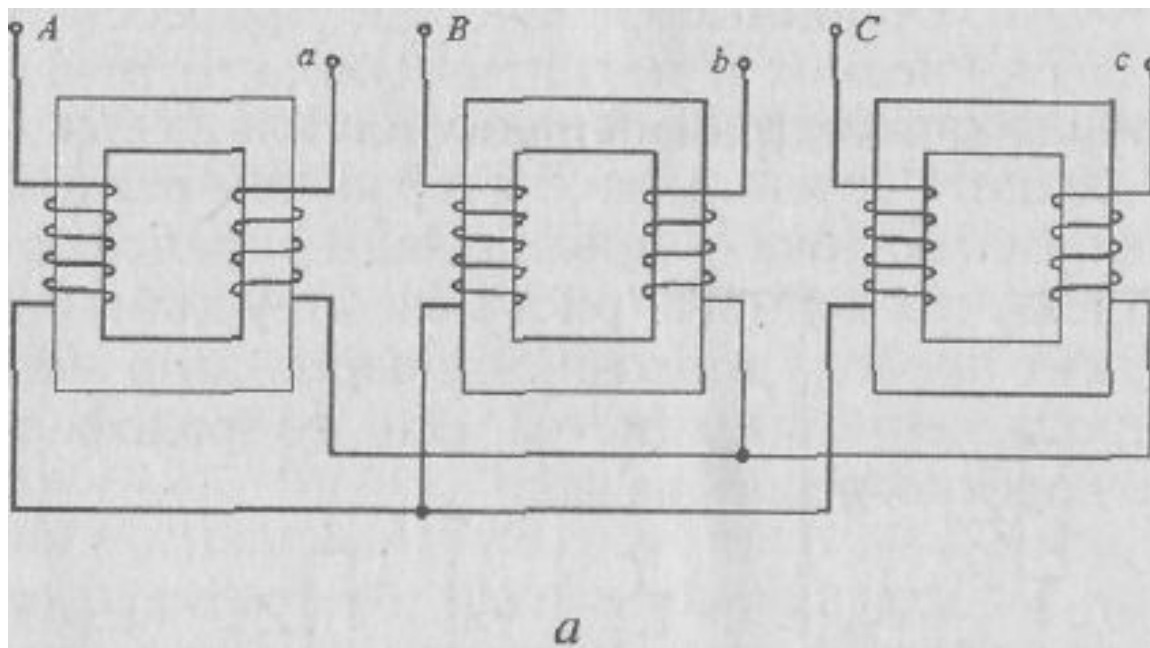
# Особенности автотрансформаторов

- Ток в общей части обмотки автотрансформатора меньше, чем в остальной ее части, поскольку по общей части обмотки протекают почти встречные токи первичной и вторичной цепей.
- Мощность первичной цепи передается во вторичную цепь как электромагнитным (трансформаторным), так и электрическим способами.

# Достоинства автотрансформаторов:

- экономичность — обмоточные материалы расходуются только на одну обмотку;
- меньшие потери в меди и больший КПД - токи в общей части направлены встречно;
- возможность плавной регулировки напряжения  $U_2$  вторичной цепи при непрерывном скольжении контакта по зачищенной поверхности витков.

# Трехфазные трансформаторы

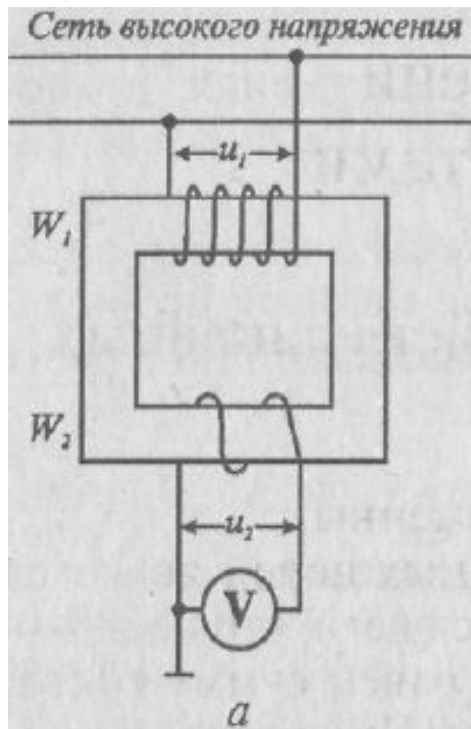


# Измерительные трансформаторы

---

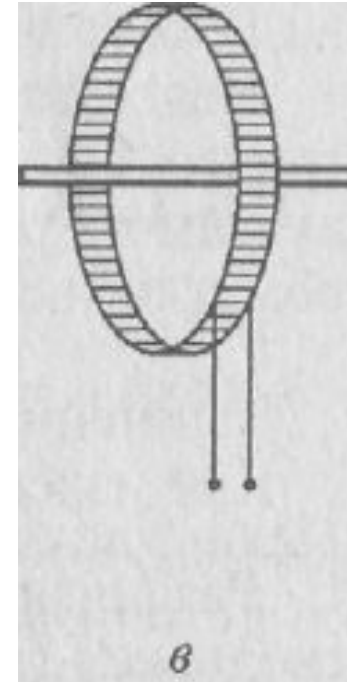
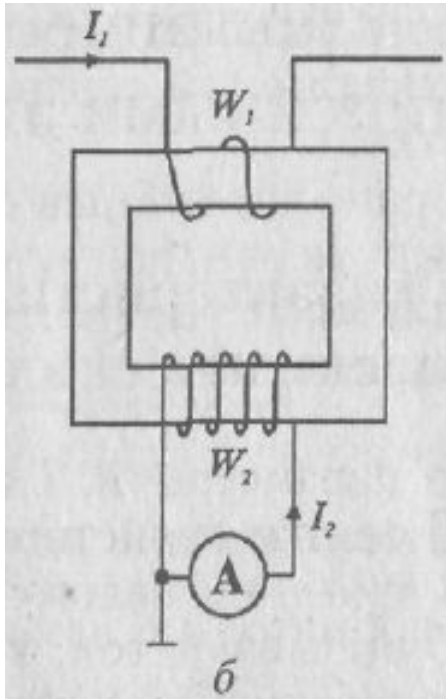
- Измерительные трансформаторы напряжения и тока.
- Используются для подключения измерительных приборов в цепи высокого напряжения и больших токов.
- Выполняются как обычные двухобмоточные трансформаторы.

# Измерительные трансформаторы напряжения



$$U_2 = nU_1 = \frac{W_2}{W_1} U_1, n \ll 1,$$

# Измерительные трансформаторы тока



$$I_1 = nI_2 = \frac{W_2}{W_1} I_2, \quad n \gg 1,$$

# *Конструкция трансформаторов*

---

- Конструктивное исполнение трансформатора зависит от его назначения и области применения.
- Однако почти все трансформаторы имеют одни и те же главные конструктивные элементы — магнитную систему и обмотки.
- Наиболее широко применяются силовые трансформаторы, которые служат для передачи электрической энергии и распределения ее между потребителями.

# Плотность тока в обмотках

- Плотность тока в обмотках выбирают по условиям нагрева в пределах  $(1-2,5) \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$  в сухих и  $(2-4,5) \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$  в масляных в зависимости от мощности и конструктивного выполнения трансформатора.
- По условиям технологии максимальное сечение круглого проводника выбирается примерно до  $20 \text{ мм}^2$ , а прямоугольного —  $80 \text{ мм}^2$ .
- Предельный ток одного проводника — соответственно 45 и 360 А.



# Элементы обмотки

- Основным элементом обмотки является виток, который выполняется одним или группой параллельных проводов.
- Ряд витков на цилиндрической поверхности называется слоем.
- Витки могут группироваться в катушки.
- По направлению намотки обмотки делятся на правые и левые подобно резьбе винта.
- Большинство обмоток трансформаторов выполняются с левой намоткой для удобства изготовления.

# Разновидности обмоток

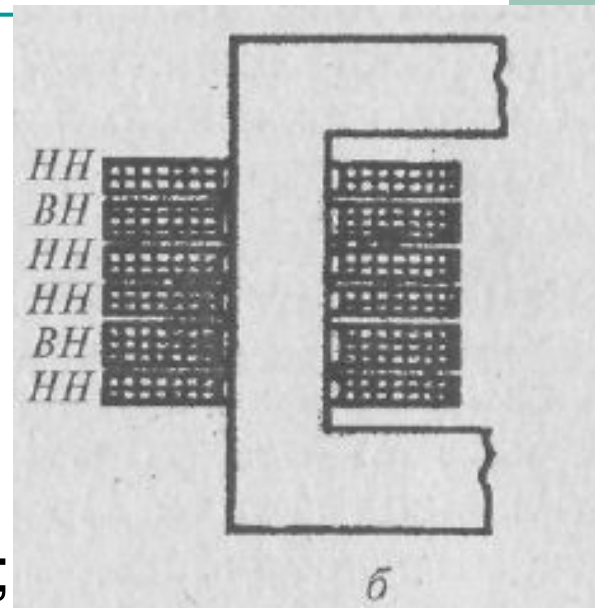
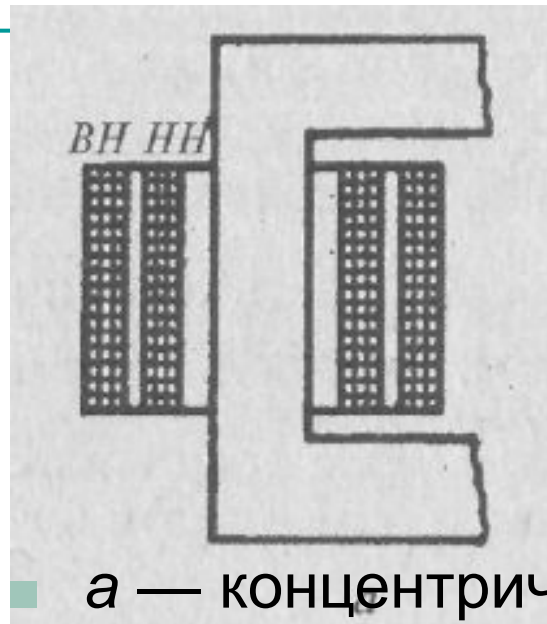
---

- Определяющими для конструкции обмотки являются число витков, сечение витка и класс напряжения.
- По способу размещения обмоток на стержне различают обмотки концентрические и дисковые или чередующиеся.
- По конструктивно-технологическим признакам обмотки делятся на следующие основные типы: цилиндрические, винтовые и непрерывные.

# Разновидности обмоток

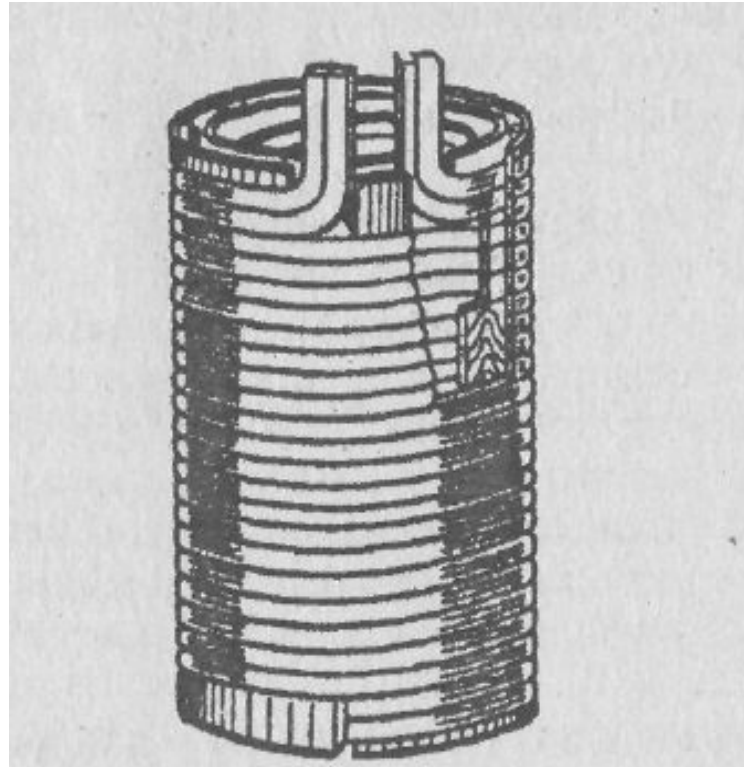
- Обмотки каждого из этих типов могут подразделяться на одно- или многослойные цилиндрические, одно- или многоходовые винтовые, дисковые, переплетенные.
- В мощных трансформаторах, предназначенных для питания электропечей, применяют обмотки из листовой меди или алюминия, а также кованые катушки выполненные из шинной меди или алюминия.

# Типы обмоток трансформаторов



- *a* — концентрические;
- *б* — дисковые или чередующиеся;
- *HH* — обмотки низкого напряжения;
- *BH* — обмотки высокого напряжения

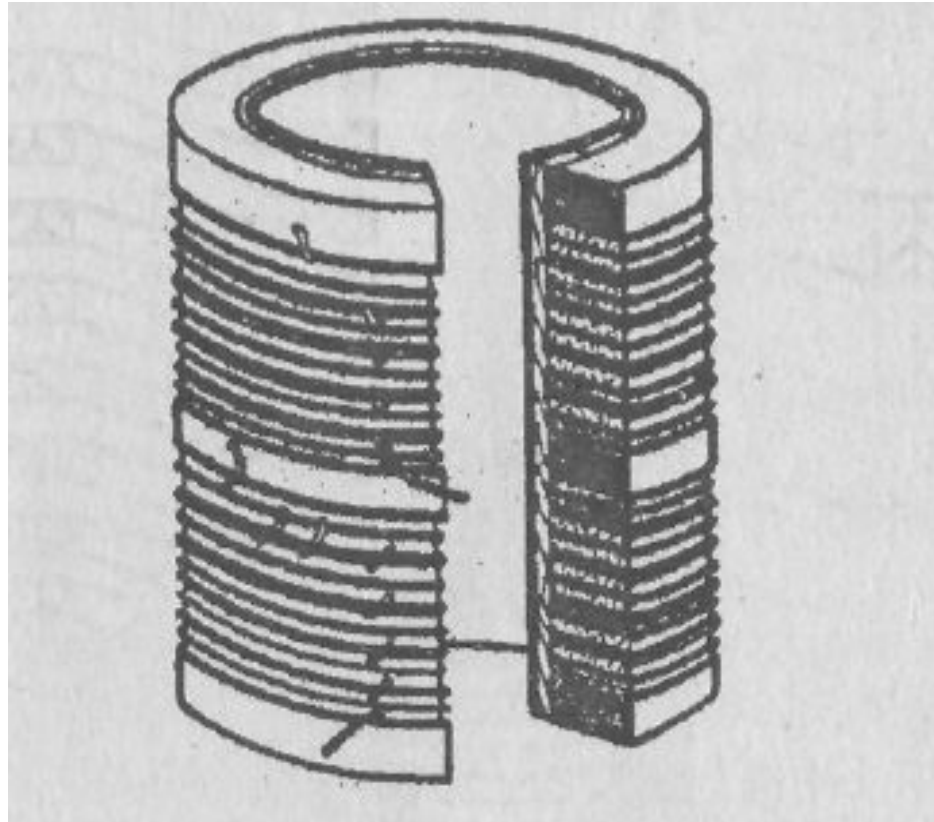
# Цилиндрическая двухслойная обмотка



# Цилиндрические слоевые обмотки

- Цилиндрические слоевые обмотки выполняются из проводов прямоугольного или круглого сечения. Слои обмотки составляют витки, наматываемые по винтовой линии. При намотке каждый виток слоя укладывают вплотную к предыдущему витку в направлении высоты обмотки.
- Переход из слоя в слой осуществляется в процессе намотки без пайки. Витки состоят из одного или нескольких параллельных проводов, располагаемых обычно рядом в осевом направлении.

# Катушечная многослойная цилиндрическая обмотка

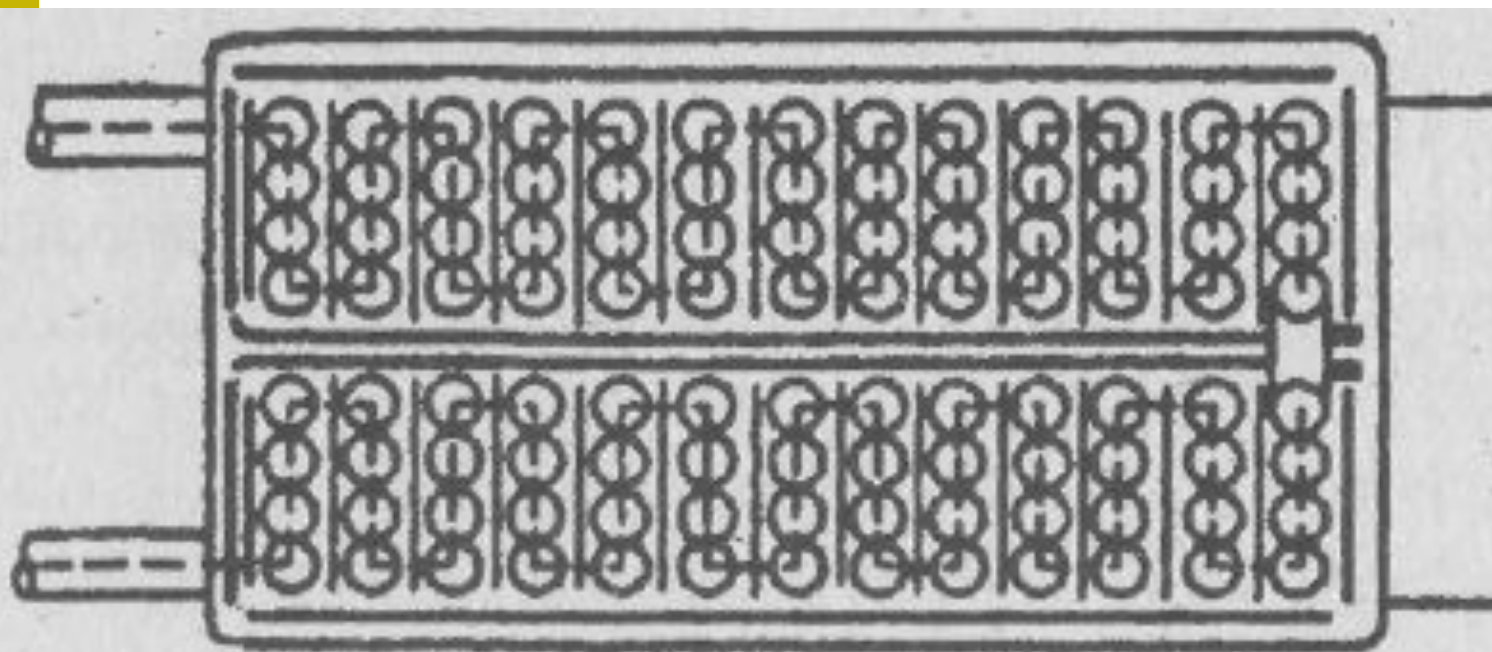


# Катушечная многослойная цилиндрическая обмотка

- Катушечная многослойная цилиндрическая обмотка состоит из ряда последовательно соединенных многослойных катушек.
- Такое разделение необходимо для уменьшения напряжения между слоями.
- Обычно катушечные обмотки выполняют в виде последовательно соединенных парных (двойных) катушек.



# Дисковая катушка чередующейся обмотки из круглого провода



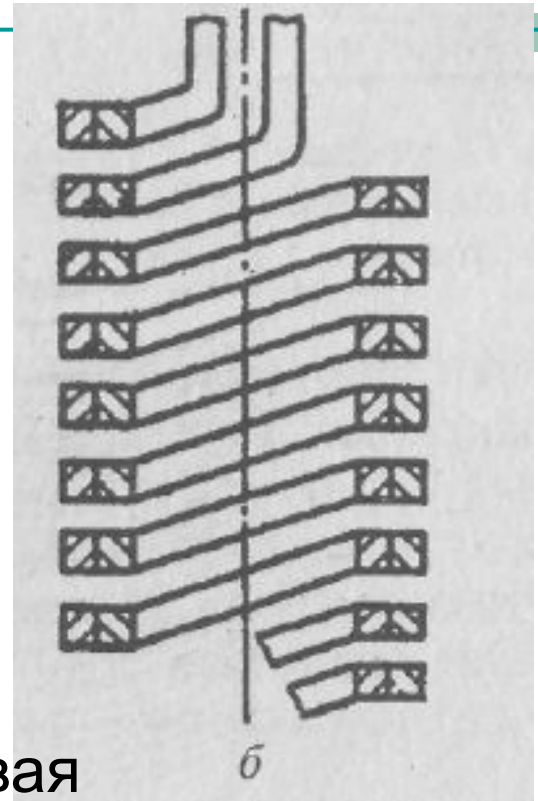
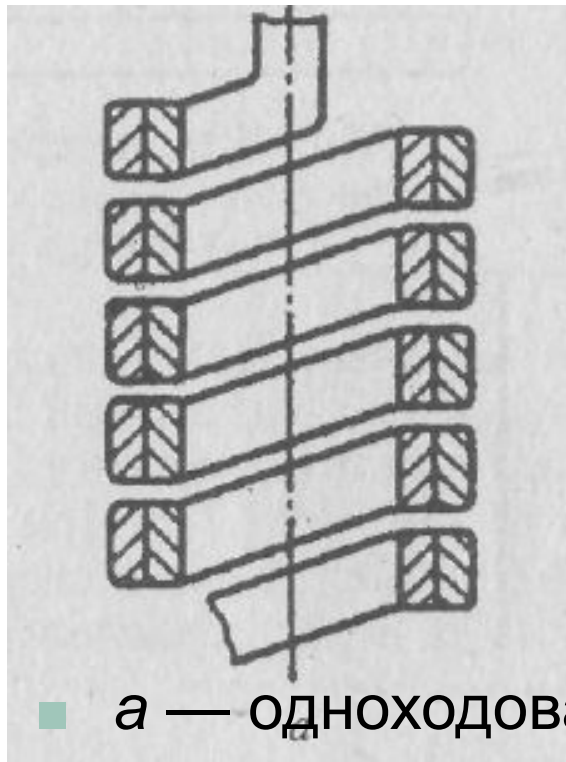
# Дисковые катушечные обмотки

- Дисковые катушечные обмотки состоят из ряда одинарных или двойных катушек.
- Число витков в одной катушке достигает 20—25, число параллельных проводников в витке - до 8. Витки катушки намотаны один на другой по спирали в радиальном направлении. Намотанные катушки собирают на шаблоне и соединяют пайкой. Осевые и радиальные каналы образуются П-образными замковыми прокладками.
- Такие обмотки широко применяются в высоковольтных трансформаторах в качестве входных катушек.

# Винтовые обмотки

- Винтовая обмотка состоит из ряда витков, наматываемых по винтовой линии.
- В трансформаторах большой мощности число параллельных проводников может достигать многих десятков.
- Винтовые обмотки бывают одно-, двух- и многоходовыми.
- Двухходовые и многоходовые обмотки состоят соответственно из двух или более отдельных винтовых обмоток, вмотанных одна в другую. Каналы для охлаждения образуются так же, как и в непрерывной обмотке.

# Винтовые обмотки



■ *a* — одноходовая; *б* — двухходовая

# Непрерывные обмотки

- Непрерывная обмотка состоит из ряда катушек, расположенных в осевом направлении и соединенных между собой последовательно без пайки.
- Число катушек в обмотке - от 30 до 150. Витки в катушке наматываются плашмя по спирали в радиальном направлении.
- Катушки наматываются на рейках, образующих вертикальные каналы.
- На рейки надеваются прокладки, создающие радиальные каналы между катушками.

# Непрерывные обмотки

---

- Каждый виток обмотки может состоять из одного или нескольких параллельных проводов.
- Путем перестановки (транспозиции) параллельных проводов на переходах из катушки в катушку обеспечивается выравнивание их активного и индуктивного сопротивлений.

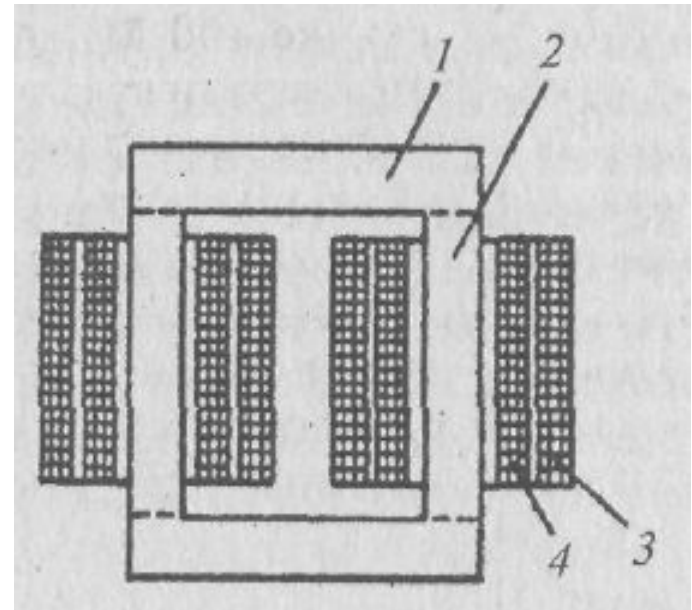
# Конструкции магнитных систем

---

- Конструкции магнитных систем трансформаторов можно разделить на два основных типа: *стержневые* и *броневые*.
- Для силовых трансформаторов применяют преимущественно магнитные системы стержневого типа.

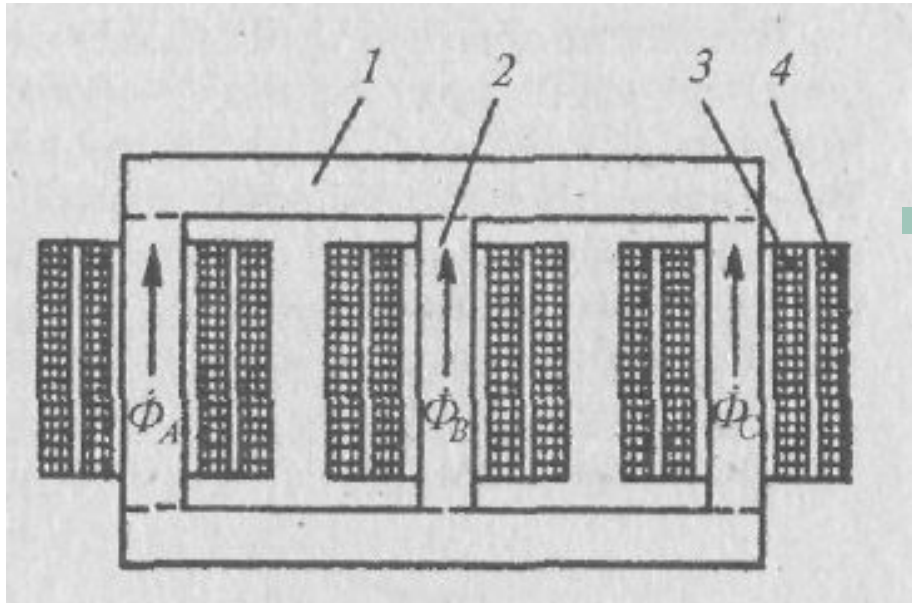
# Однофазные стержневые трансформаторы

- Однофазные стержневые трансформаторы имеют два стержня 2, несущие обмотки 3, 4.



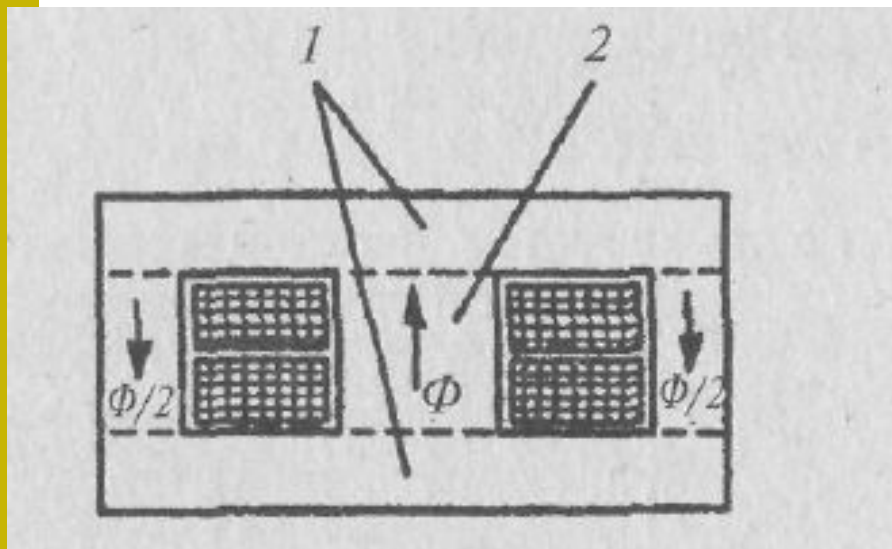


# Трехфазные стержневые трансформаторы



- Трехфазные стержневые трансформаторы имеют три стержня.
- Стержни соединяются верхним и нижним ярмами.

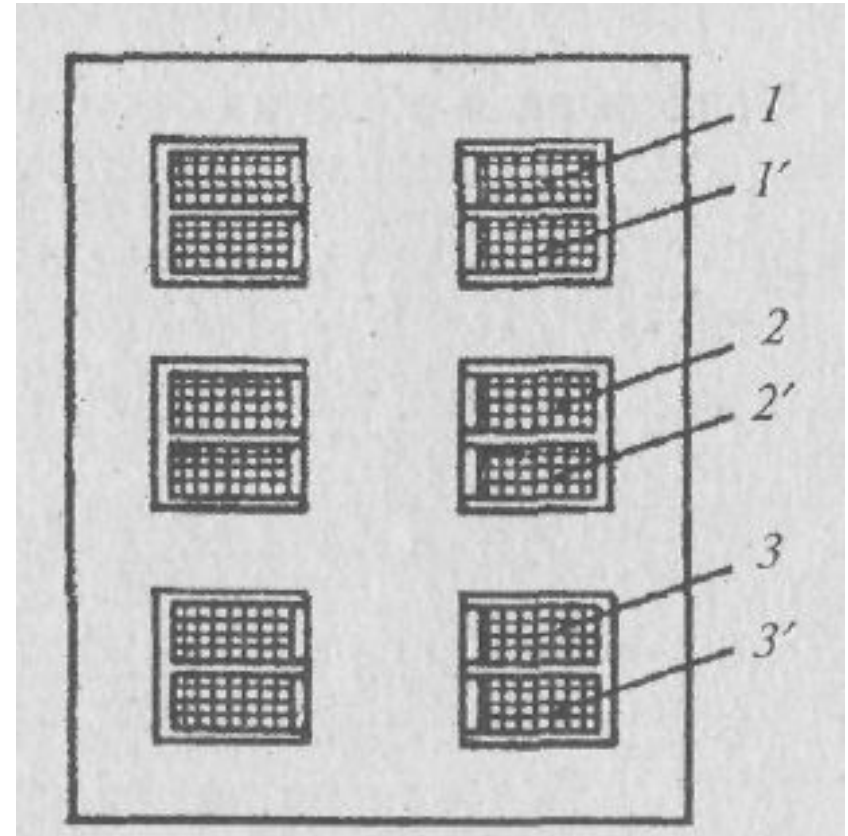
# Однофазный броневой трансформатор



- Однофазный броневой трансформатор имеет один стержень 2 и два ярма 1, закрывающие (бронирующие) обмотки.

# Трехфазный броневой трансформатор

- Трехфазный броневой трансформатор получается из трех однофазных, если их поставить друг на друга. При такой конструкции потоки в ярмах равны половине потока в стержнях.
- 1, 2, 3 — обмотки НН фаз А, В, С;
- 1', 2', 3' — обмотки ВН фаз А, В, С.



# Конструкция силовых трансформаторов

- В силовых трансформаторах мощностью свыше 100 МВ·А и напряжениями 220 кВ и выше применяют бронестержневую или многостержневую конструкцию. Эта конструкция получается из стержневой, если добавить два стержня, закрывающих обмотки двух фаз, расположенных на крайних стержнях трехфазного стержневого трансформатора. По сравнению со стержневыми бронестержневые трансформаторы имеют меньшую высоту магнитопроводов, что очень важно при транспортировке, так как позволяет им лучше вписаться в железнодорожные габариты.

# Типы магнитных систем

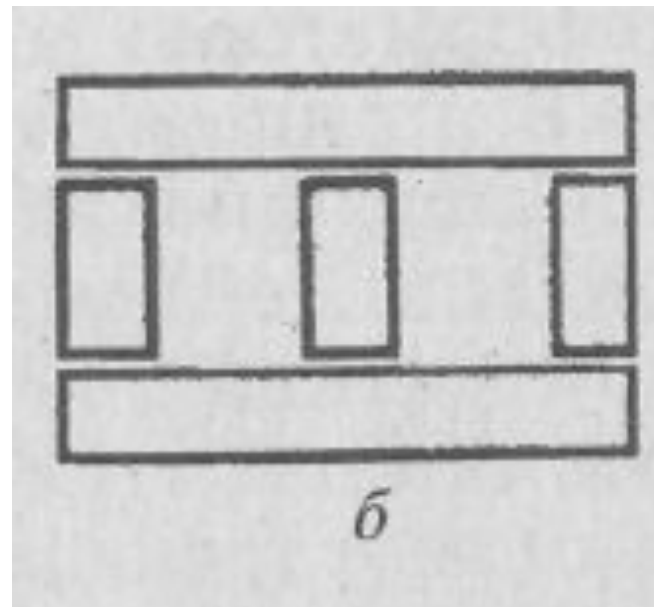
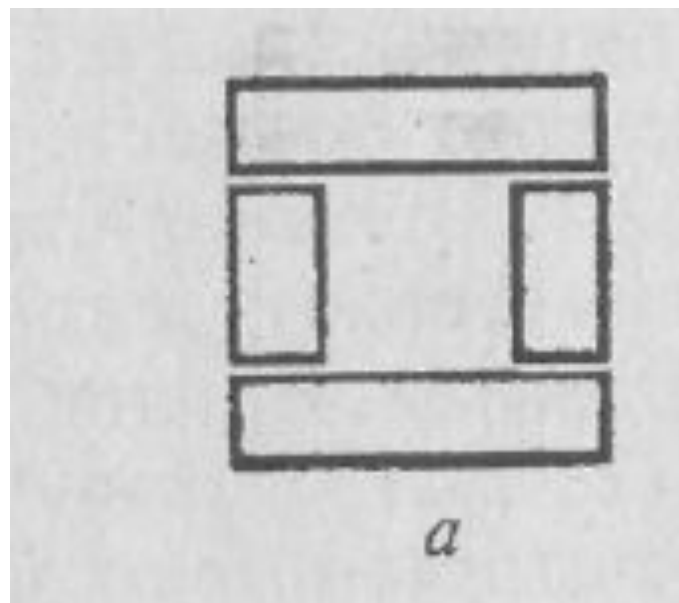
---

- По взаимному расположению стержней и ярм магнитные системы могут иметь *плоское* и *пространственное* выполнение.
- По способу соединения стержней с ярмами магнитные системы делятся на *стыковые*, *шихтованные* и *навитые*.

# Стыковые конструкции

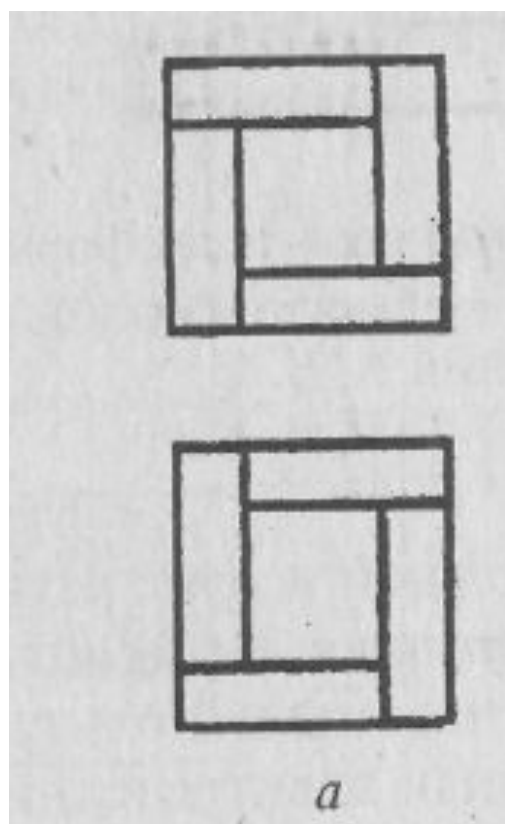
- Стержни и ярма собираются отдельно и крепятся друг с другом стяжными шпильками.
- В месте стыков ставятся изоляционные прокладки, которые устраняют замыкание листов стали стержней и ярм.
- Немагнитные зазоры при стыковой конструкции увеличивают магнитное сопротивление, что приводит к увеличению тока холостого хода.
- Поэтому стыковые соединения применяются редко, хотя стыковые конструкции менее трудоемки.

# Магнитопроводы стыковых конструкций



- а - однофазный, б – трехфазный

# Схемы укладки листов стали в шихтованных магнитопроводах





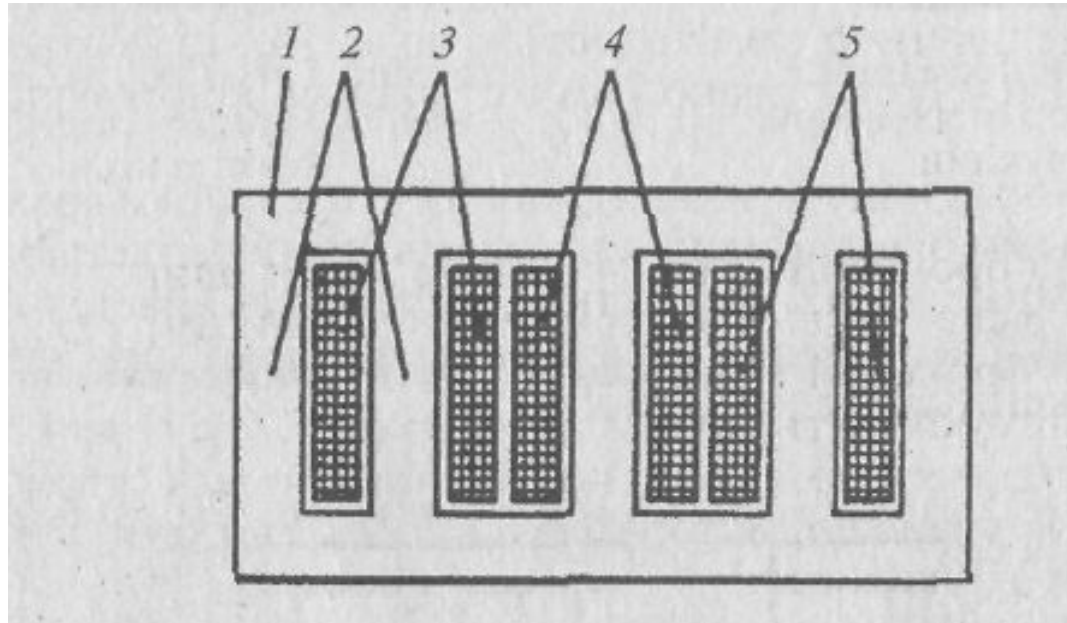
# Материал магнитной системы

- В качестве материала магнитной системы используется главным образом холоднокатаная текстурованная электротехническая сталь марок 3413, 3404, 3405, 3406, которая поставляется на заводы в рулонах. Толщина стали 0,3; 0,35; 0,5 мм.
- Сталь толщиной 0,3 и 0,35 мм имеет электроизоляционное нагревостойкое покрытие, а сталь толщиной 0,5 мм не имеет электроизоляционного покрытия.
- Применение этой стали позволило повысить магнитную индукцию в магнитопроводах силовых трансформаторов до 1,7—1,8 Тл при одновременном уменьшении массы, потерь и тока холостого хода.

# Шихтованные конструкции

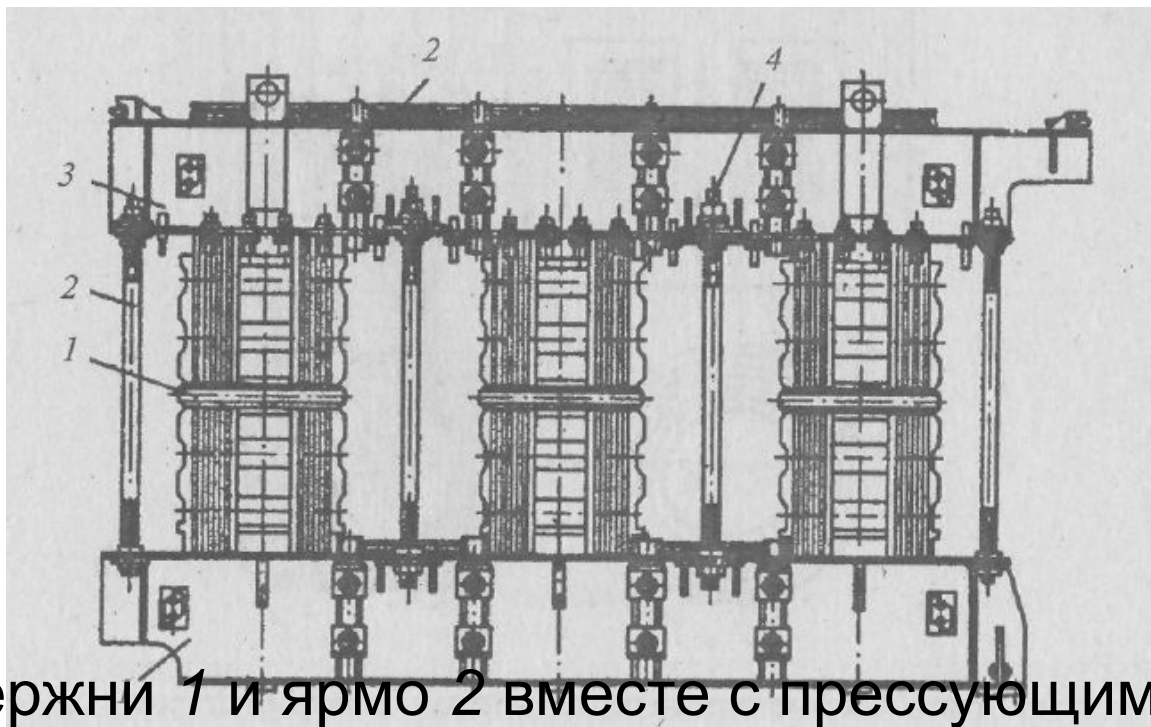
- В шихтованных конструкциях стержни и ярма не являются отдельными элементами, а их пластины переплетаются (шихтуются) в смежных слоях. Магнитная система собирается из отдельных слоев, каждый из которых состоит из одной или нескольких пластин, уложенных в слое встык.
- По форме стыка шихтованные магнитные системы могут выполняться с *прямым* и *косым* стыками, что необходимо для уменьшения длины участков магнитной цепи, на которых направление магнитного потока не совпадает с направлением прокатки электротехнической стали.

# Трехфазный бронестержневой трансформатор



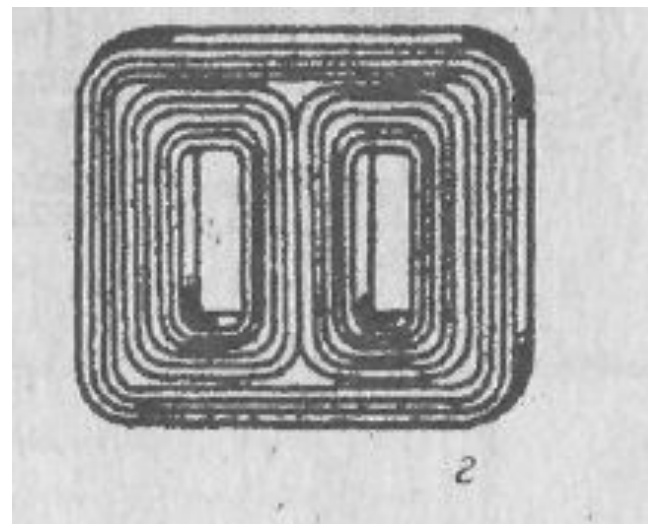
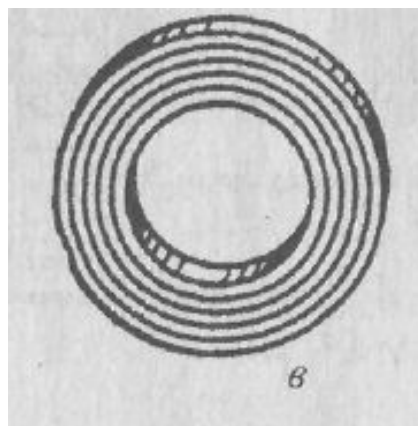
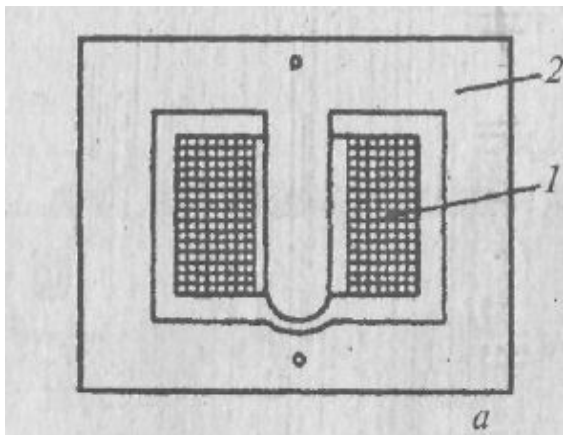
- 1 — ярма; 2 — стержни; 3, 4, 5 — обмотки фаз высшего и низших напряжений А, В, С

# Остов трансформатора

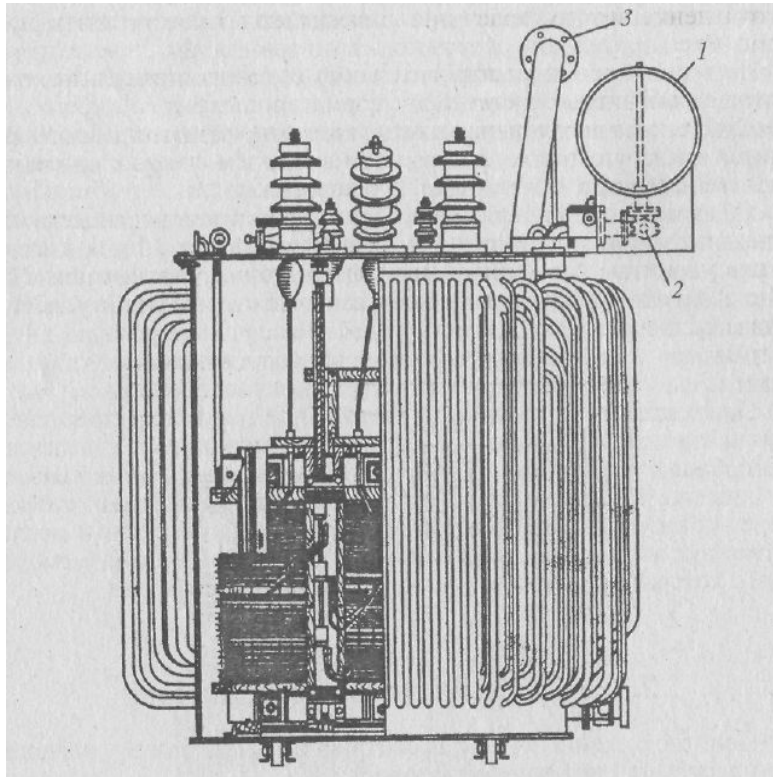


Стержни 1 и ярмо 2 вместе с прессующими деталями (3— балка, 4 — шпилька) образуют остов трансформатора.

# Магнитные системы микротрансформаторов



# Общий вид трансформатора мощностью 100 кВ-А и напряжением 6 кВ



- 1 – расширитель;
- 2 – газовое реле;
- 3 – выхлопная труба

# Схемы и группы соединений

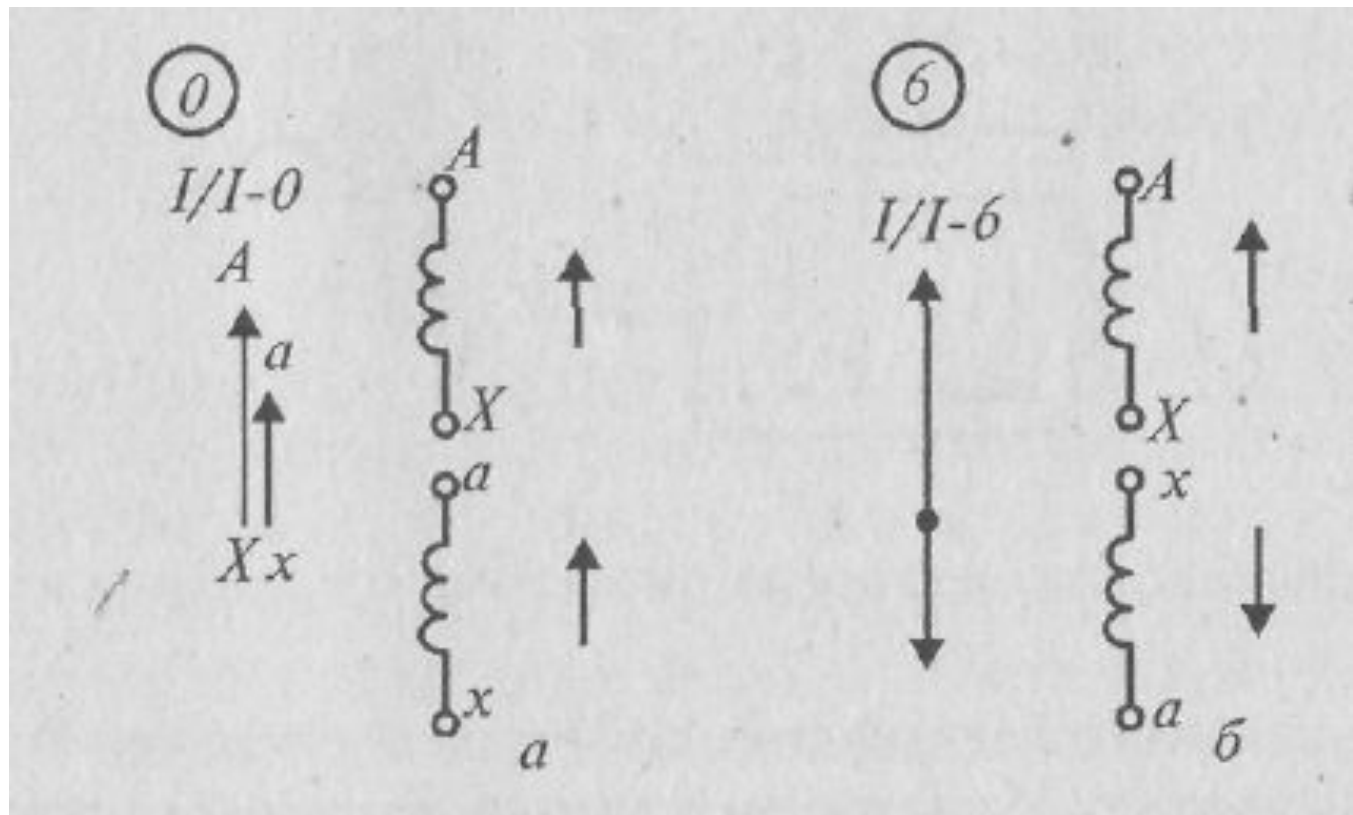
- В однофазных трансформаторах начала обмоток обозначаются **A, a**, а концы **X, x**. Большие буквы относятся к обмоткам высшего напряжения, а малые — к обмоткам низшего напряжения.
- В трехфазных трансформаторах начала обмоток высшего напряжения обозначаются **A, B, C**, а концы **X, Y, Z**. Начала обмоток низшего напряжения — **a, b, c**, а концы — **x, y, z**. Нулевые точки — **O** и **o**. Если есть третья обмотка среднего напряжения, используются обозначения **A<sub>m</sub>, B<sub>m</sub>, C<sub>m</sub> и X<sub>m</sub>, Y<sub>m</sub>, Z<sub>m</sub>**.

# Группы соединений однофазных трансформаторов

- Для однофазных трансформаторов возможны две группы соединений: *нулевая* и *шестая*.
- Для нулевой (или двенадцатой) сдвиг между напряжениями равен  $0^\circ$  - минутная и часовая стрелки совпадают.
- Для шестой группы сдвиг между напряжениями  $180^\circ$ , стрелки показывают 6 ч.
- Эти группы обозначаются соответственно *///-0* и *///-6*.
- Стандартизована и применяется группа 0.



# Группы соединений однофазных трансформаторов



# Схемы и группы соединений

---

- При включении трансформаторов на параллельную работу удобно соединять начала обмоток одного трансформатора с началом обмоток другого и стандартизовать обозначения.

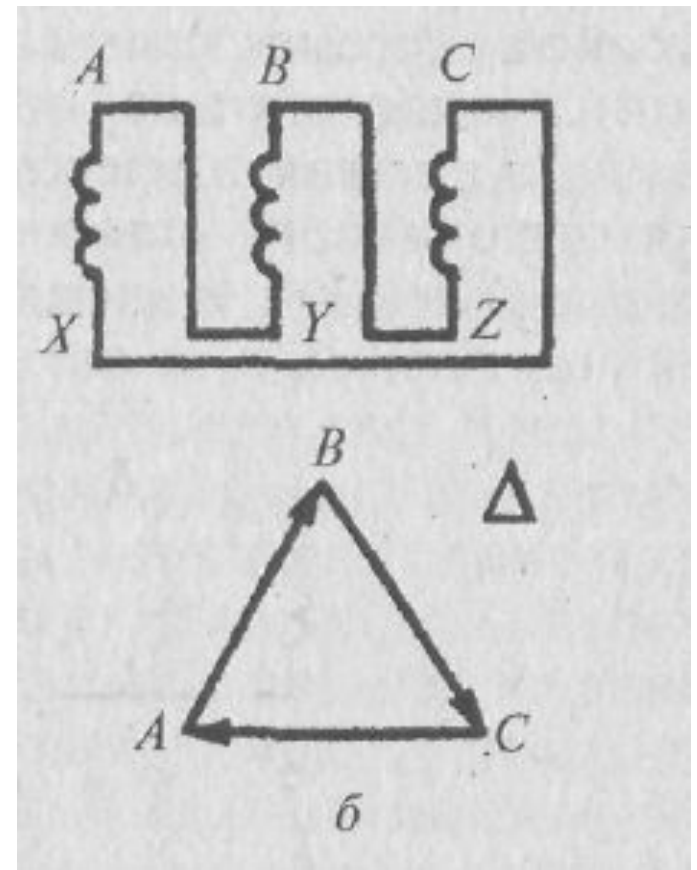
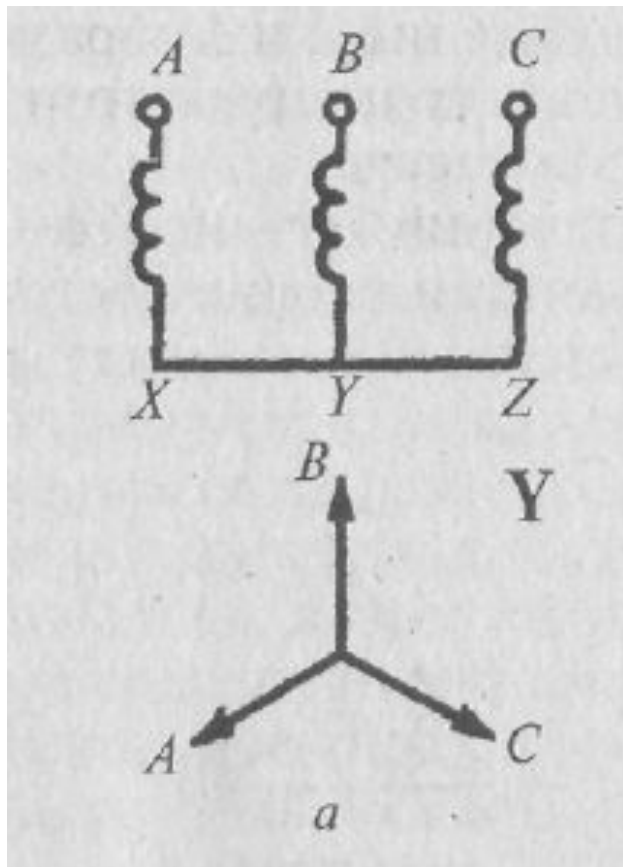
# Схемы и группы соединений

- Принято сдвиг фаз между линейными напряжениями обмоток характеризовать положением стрелок на циферблате часов. Электродвижущую силу обмотки высшего напряжения совмещают с минутной стрелкой и устанавливают на цифре 12. Часовая (малая) стрелка совмещается с напряжением обмотки низшего напряжения.

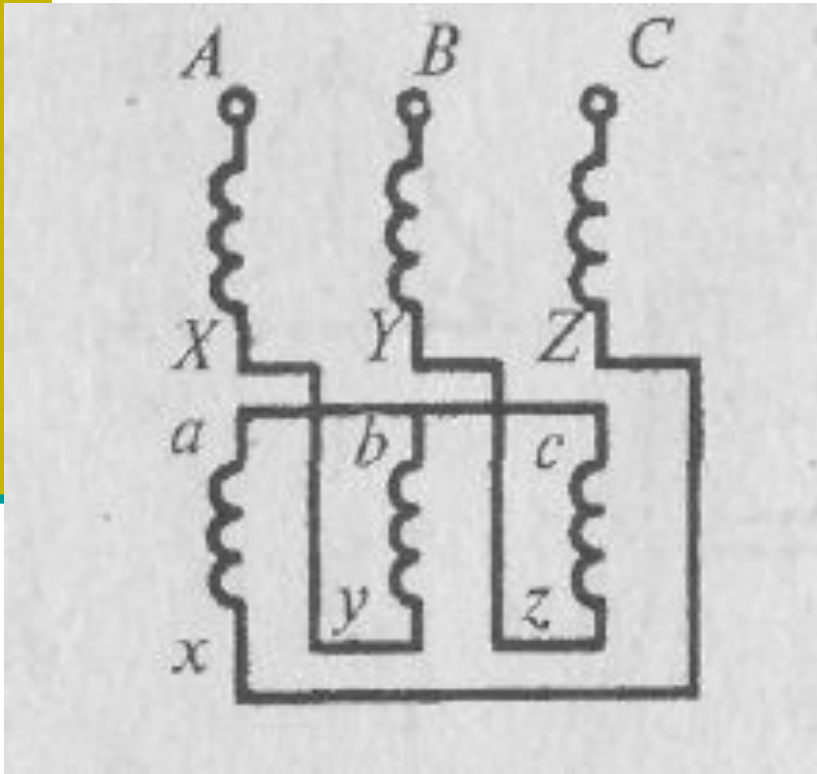
# Схемы и группы соединений

- В трехфазных и многофазных трансформаторах наибольшее применение имеют схемы соединения в звезду и треугольник.
- Схема соединения в зигзаг применяется редко, а другие комбинации соединений обмоток практически не применяются.
- Схема соединения в звезду обозначается буквой  $Y$ , соединения в треугольник —  $\Delta$ , в зигзаг —  $Z$ .

# Схемы и векторные диаграммы соединения обмоток $Y$ и $\Delta$



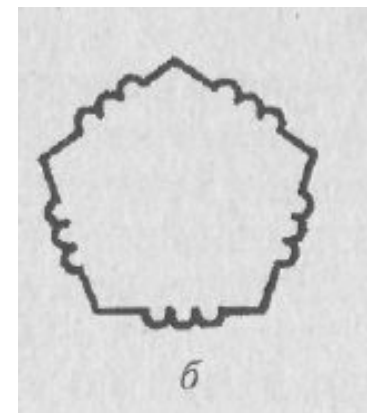
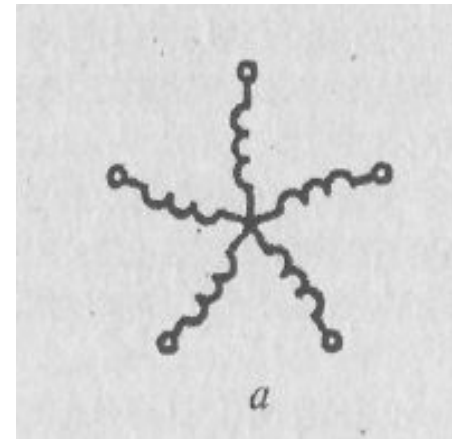
# Схема соединения в зигзаг



- В соединениях в звезду и зигзаг можно вывести нулевую точку.
- В этом случае получают соединения в звезду с нулевой точкой и в зигзаг с нулевой точкой.

# Принципы соединения обмоток для многофазных трансформаторов

- Например, для пятифазной системы схемами соединения будут пятифазная звезда и пятиугольник (рисунок а, б),
- для  $m$ -фазной системы —  $m$ -фазная звезда и  $m$ -угольник.

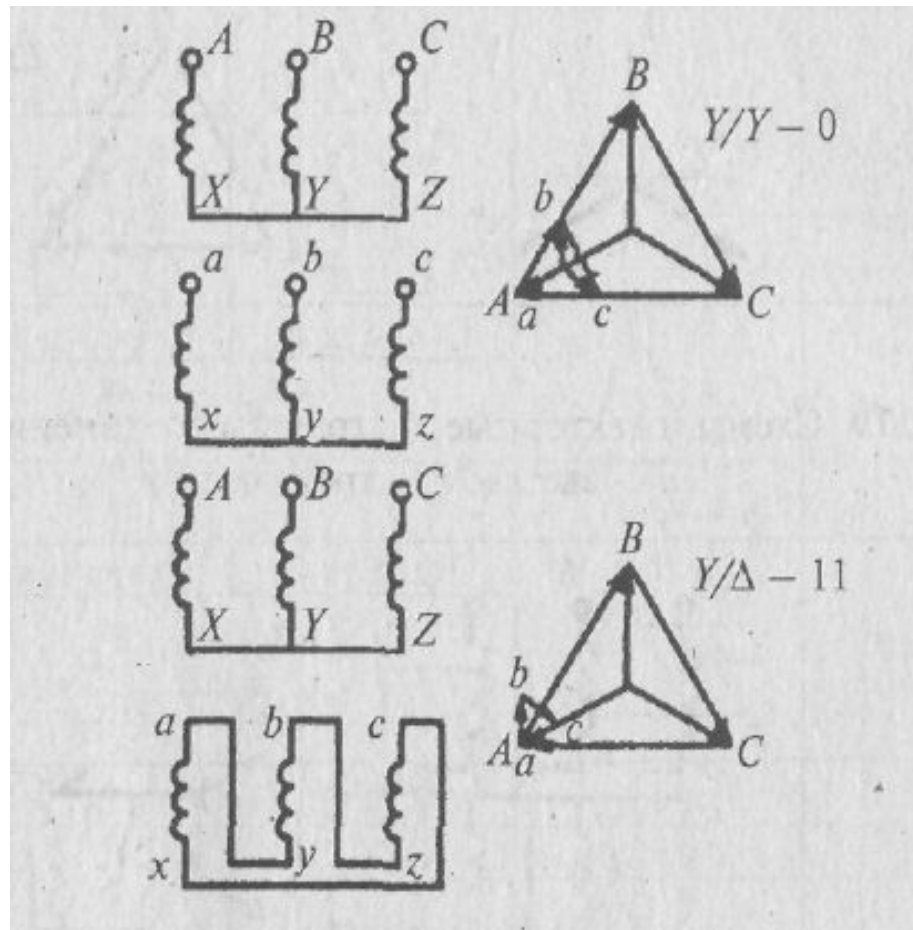


# Группы соединений трехфазных систем

- В трехфазной системе схемы соединений  $Y$  и  $\Delta$  образуют 12 групп соединений со сдвигом фаз линейных напряжений на  $30^\circ$ , что соответствует 12 цифрам циферблата часов.
- Стандартизованы две группы соединений  $Y/Y-O$  и  $Y/\Delta-11$  со сдвигом фаз  $0^\circ$  и  $330^\circ$ . В эксплуатации вполне достаточно иметь две группы соединений и не выпускать 10 остальных групп.



# Группы соединений трехфазных трансформаторов «0» и «11»



# Определение группы соединений

- Соединяют одноименные выводы обмоток высшего и низшего напряжений, например  $A$  и  $a$ .
- Присоединяют трансформатор к сети с симметричным напряжением и измеряют напряжения между выводами трансформатора.
- По измеренным напряжениям строят векторную диаграмму, которая должна совпасть с одной из диаграмм таблицы 1.
- После этого определяют группу соединения трансформатора.