

# **Электрические трансформаторы**

---

**Магнитные системы трансформаторов**

## Общие сведения

- В конструктивном отношении современный силовой масляный трансформатор можно схематически представить состоящим из трех основных систем:
  - *магнитной (магнитопровода);*
  - *системы обмоток с их изоляцией;*
  - *системы охлаждения и вспомогательных систем* - устройства регулирования напряжения, измерительных и защитных устройств, арматуры и др.
- В трансформаторах с *воздушным охлаждением*, как правило, *отсутствуют* измерительные и защитные устройства и арматура, а система охлаждения не выделяется в виде отдельных конструктивных единиц.
- Магнитопровод представляет собой магнитную систему трансформатора, по которой замыкается основной магнитный поток.
- Одновременно магнитопровод служит основой для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей и других деталей активной части трансформатора.

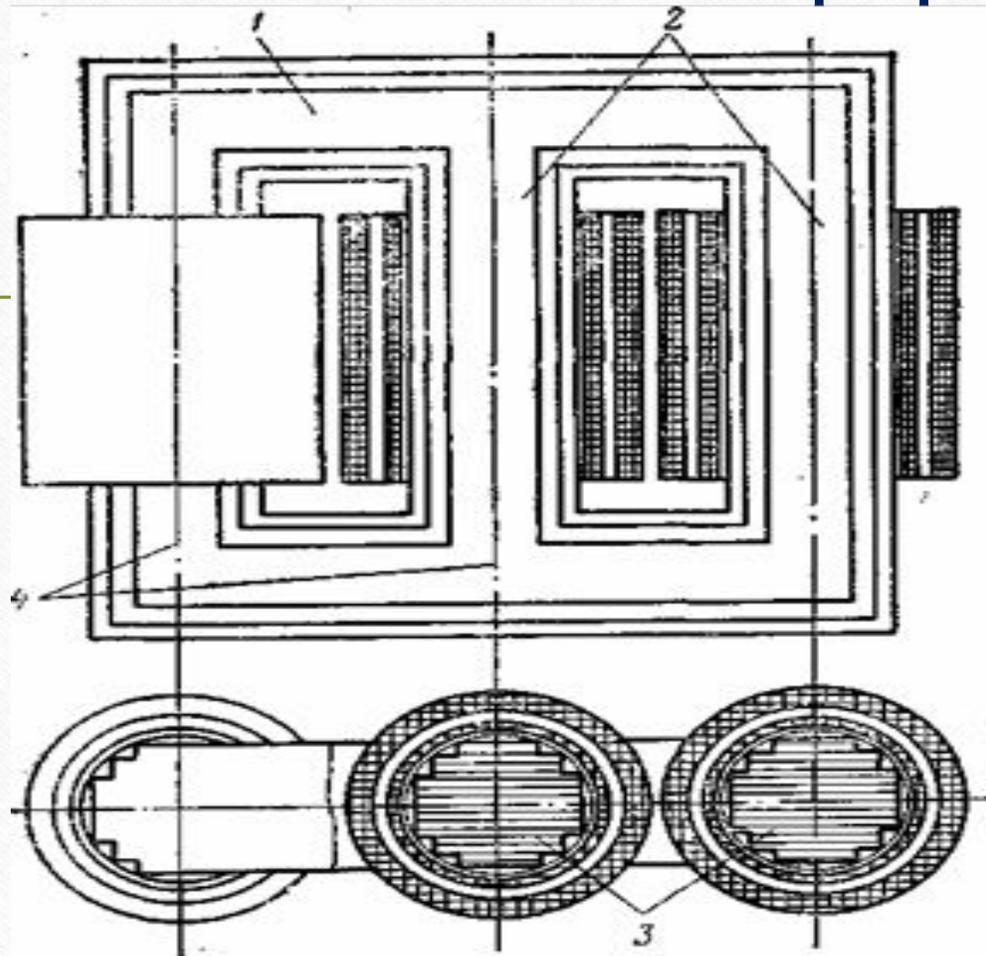
## Отдельные части магнитопровода

- Большинство типов магнитных систем можно четко подразделить на отдельные части.
- В соответствии с этим делением в магнитной системе различают:
  - **стержни** - те ее части, на которых располагаются **основные обмотки** трансформатора, служащие непосредственно для преобразования электрической энергии;
  - **ярма** - части, не несущие основных обмоток и служащие для замыкания магнитной цепи, а в некоторых типах трансформаторов также для расположения обмоток, имеющих вспомогательное назначение.
- Некоторые магнитные системы, например, **системы тороидальной формы**, намотанные в виде кольца из ленты или собранные из плоских круговых колец, отштампованных из тонколистовой стали, не подразделяются на стержни и ярма.

## Отдельные части магнитопровода

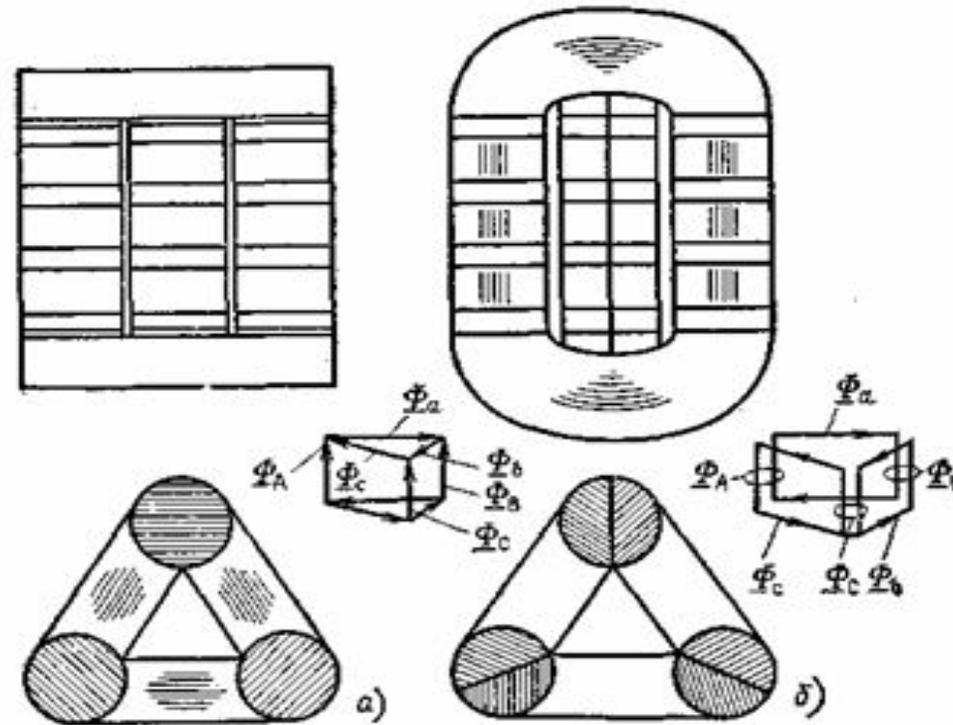
- В магнитных системах, разделяющихся на стержни и ярма, при расчете параметров холостого хода трансформатора особо выделяются части, находящиеся в зоне сопряжения стержня и ярма и называемые *углами магнитной системы*.
- Понятие «*угол*» определяется как часть ярма магнитной системы, ограниченная объемом, образованным пересечением боковых поверхностей или их продолжений одного из ярм и одного из стержней.
- Практикой трансформаторостроения в течение десятилетий были выработаны *различные схемы* взаимного расположения отдельных частей магнитной системы.
- По этому признаку все магнитные системы разделяются на:
  - *плоские* - такие, в которых продольные оси всех стержней и ярм располагаются в одной плоскости;
  - *пространственные*, в которых оси стержней и ярм располагаются не в одной плоскости.

## Плоская шихтованная магнитная система трехфазного трансформатора



1 - ярмо; 2 - стержень; 3 - сечение стержня; 4 - угол магнитной системы

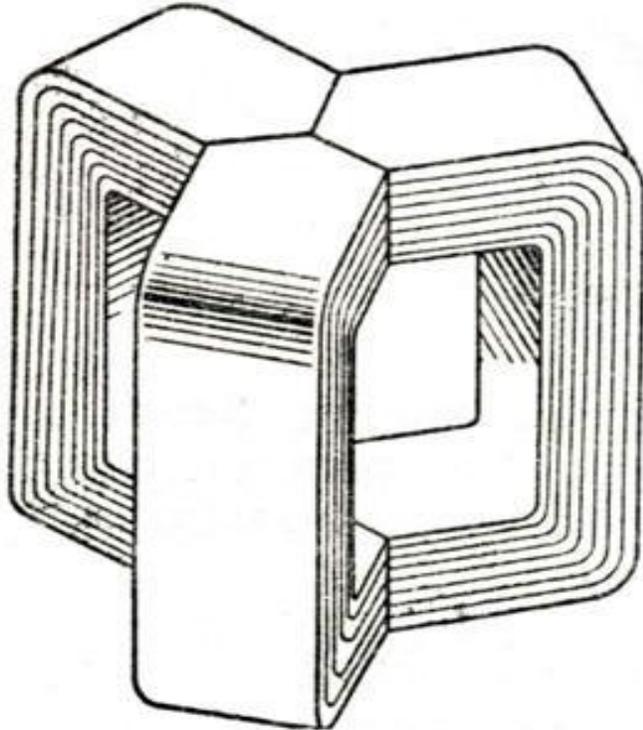
## Пространственные магнитные системы



***а*** — ***стыковая со стержнями***, собранными из плоских пластин, и навитыми ярмами;  
***б*** — ***навитая неразрезная***, состоящая из трех навитых колец пластин различной ширины, но одинаковой длины, и из ярма, навитых из ленточной стали. Обмотки на эту систему устанавливаются при ее сборке из отдельных частей.

## Несимметричные и симметричные магнитные системы

- Магнитная система, в которой все стержни имеют одинаковую форму, конструкцию и размеры, а взаимное расположение любого стержня по отношению ко всем ярмам одинаково для всех стержней, называется **симметричной** (рис).
- При отсутствии одного из этих признаков магнитная система называется **несимметричной**.



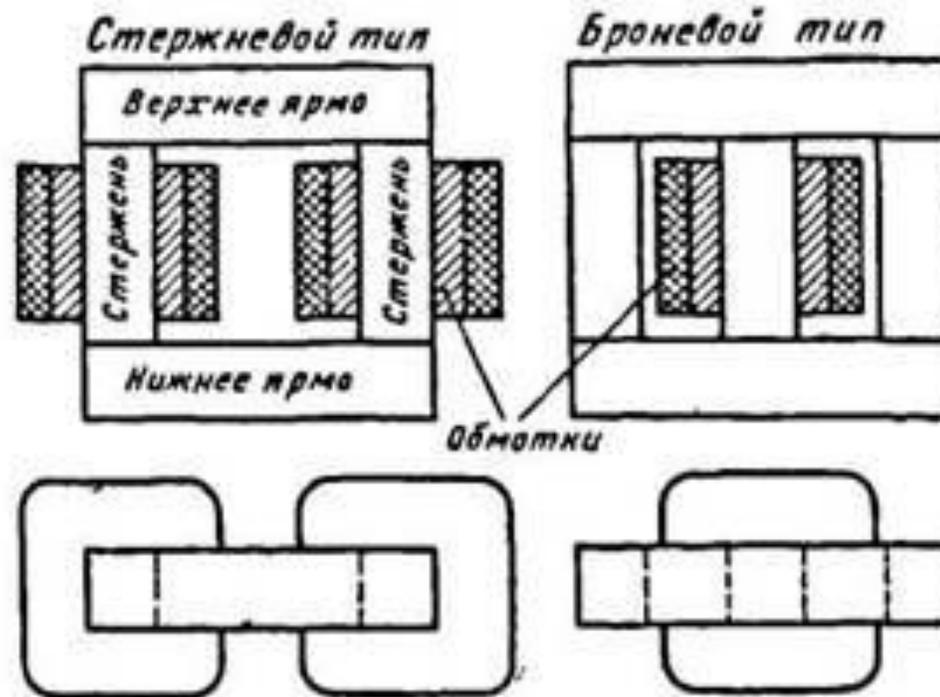
На практике в основном применяются трансформаторы с плоской трехстержневой магнитной системой. У неё есть **недостаток** – **магнитная несимметрия**, которая компенсируется простотой конструкции.

Применение симметричных магнитных систем для трансформаторов расширяется, несмотря на сложность таких конструкций, ограничивающих их практическое использование.

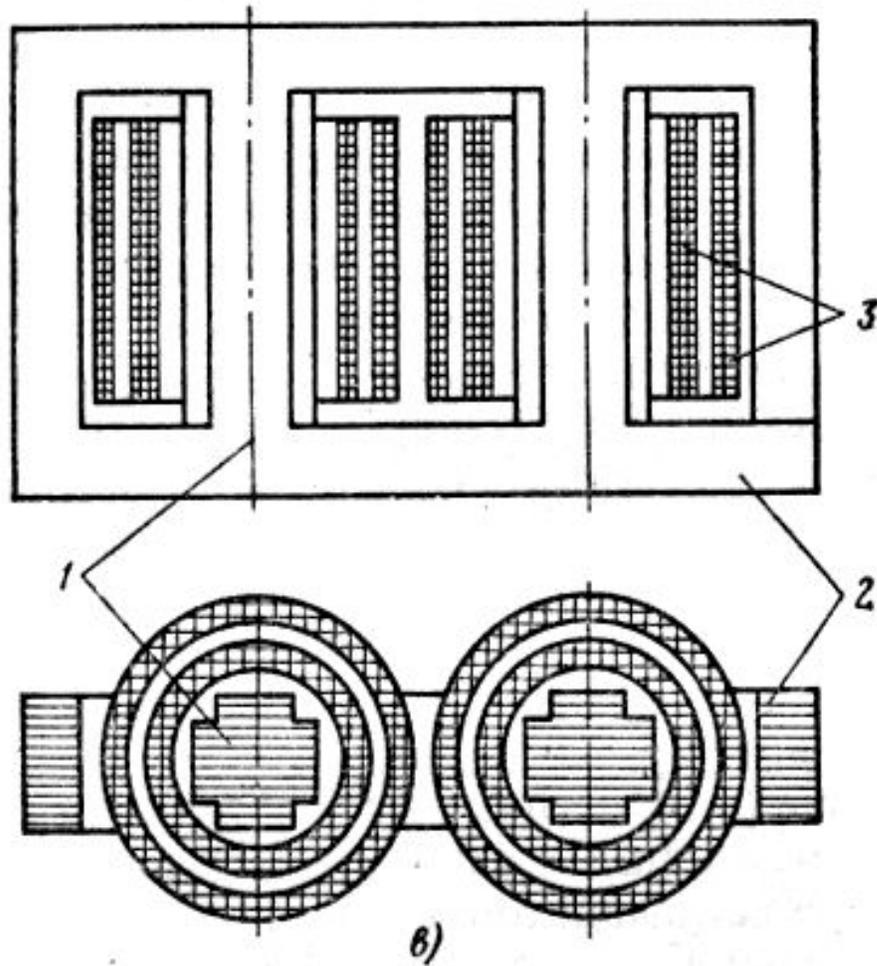
## Типы магнитных систем по взаимному расположению стержней и ярм

- По взаимному расположению стержней и ярм плоские и пространственные магнитные системы могут также подразделяться на:

- стержневые;
- броневые;
- бронестержневые.



## Бронестержневой тип магнитной системы однофазного трансформатора



1 — стержень, 2 — ярмо, 3 — обмотка

## Сравнение магнитных систем

- У трансформатора стержневого типа обмотки охватывают стержни магнитопровода.
- У трансформатора броневого типа магнитопровод, наоборот, как «броней», охватывает обмотки.
- В случае неисправности в обмотке броневого трансформатора ее неудобно осматривать и трудно ремонтировать. Поэтому наибольшее распространение получили трансформаторы стержневого типа.
- **Плоские бронестержневые системы** и **броневые системы**, аналогичные по форме обмоток и сечения стержня системам стержневым, **требуют** несколько **большого расхода электротехнической стали** и применяются в некоторых типах трансформаторов большой мощности (**более 100000 кВА**) с целью уменьшения высоты трансформатора.
- Наибольшее распространение в практике трансформаторостроения получили **плоские магнитные системы стержневого типа** со ступенчатой формой поперечного сечения стержня, вписанной в окружность, и с обмотками в виде круговых цилиндров.

## Виды магнитных систем по способу сборки

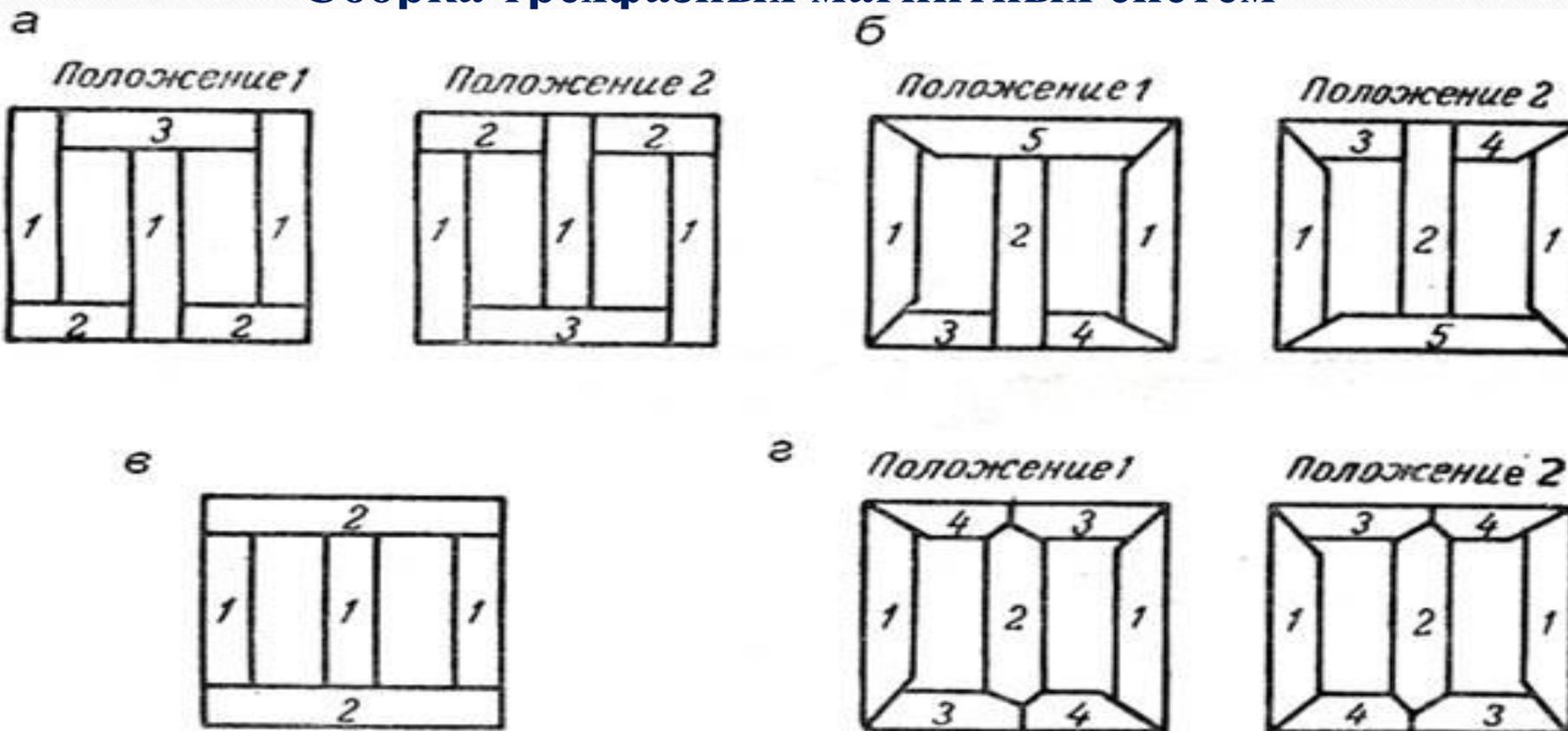
- По способу сборки различают:

- ***шихтованные магнитные системы***, ярма и стержни которых собираются впереплет из плоских пластин как единая цельная конструкция;
- ***навитые магнитные системы***, все части которых изготавливаются путем навивки из ленточной электротехнической стали, а затем скрепляются в единую конструкцию;
- ***стыковые магнитные системы***, ярма и стержни или отдельные части которых, собранные и скрепленные отдельно, при сборке системы устанавливаются встык и скрепляются специальными стяжными конструкциями или другими способами. В стыковых магнитных системах могут сочетаться части, собранные только из плоских пластин или из плоских пластин с навитыми частями.

## Шихтованная стержневая магнитная система

- При шихтованной конструкции стержни и ярма собирают в *переплет*, т. е. разбивают по толщине на слои (обычно по два или три листа), составленные из отдельных пластин так, чтобы в каждом слое часть пластин стержня заходила в ярмо.
- При этом пластины одного слоя перекрывают стыки пластин смежного слоя.
- Преимуществом шихтованной конструкции перед стыковой являются меньшая масса и большая механическая прочность, небольшие зазоры в местах стыков и меньший ток холостого хода трансформаторов.
- В результате сборки после стяжки ярм *прессующими балками* и стержней *бандажами* получается остов трансформатора, не требующий каких-либо добавочных креплений.
- Однако при шихтованной конструкции усложняется сборка трансформатора: для насадки на стержни обмоток приходится сначала расшихтовать верхнее ярмо по отдельным слоям, а затем после насадки обмоток вновь зашихтовать.
- Эта работа трудоемка и очень ответственна, так как при недостаточно тщательном ее выполнении могут резко ухудшиться характеристики трансформатора.

## Сборка трехфазных магнитных систем



Порядок сборки трехфазного, плоского магнитопровода трехстержневого типа: *а* – собираемого **впереплет** (шихтованного) с «**прямыми стыками**»; *б* – то же с «**косыми стыками**»; *в* – **стыкового**; *г* – шихтованного с «**косыми стыками**» во всех углах.

## Навитые магнитные системы

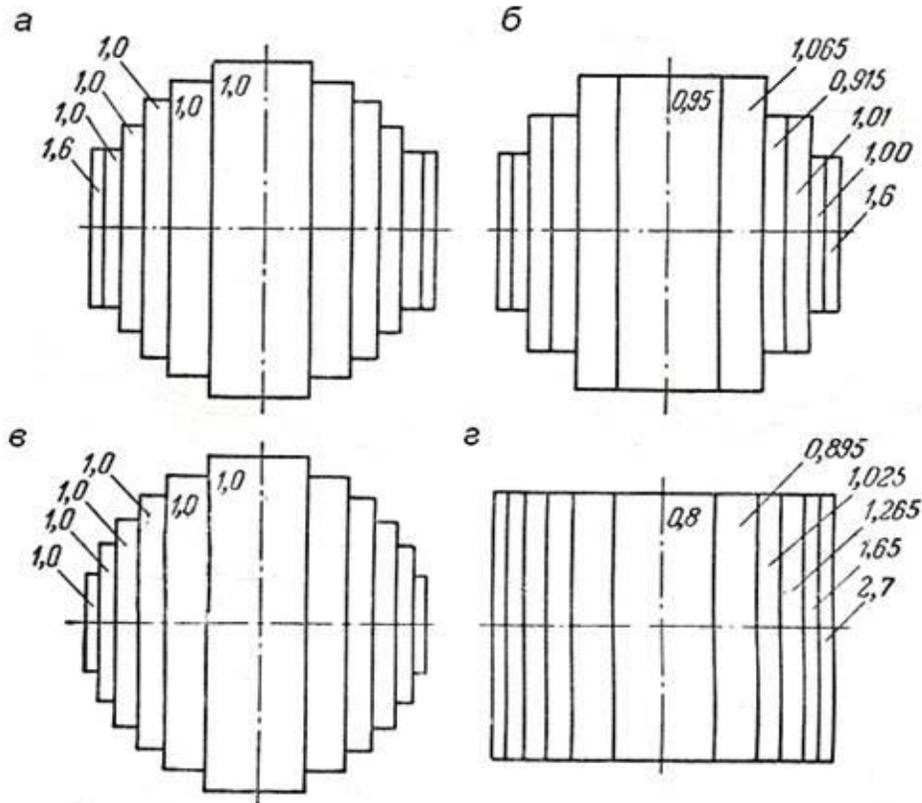
- Развитие производства холоднокатаной рулонной стали позволило найти новый способ изготовления магнитной системы, когда отдельные части системы **навиваются из стальной ленты** и затем скрепляются в единую конструкцию.
- Навитые системы могут быть:
  - **неразрезными**, когда обмотки из обмоточного провода или медной или алюминиевой ленты (фольги) наматываются непосредственно на стержни магнитной системы;
  - **стыковыми**, когда для насадки обмоток стержни магнитной системы разрезаются резом, перпендикулярным к продольной оси стержня, и навитая магнитная система становится стыковой.

## Плоские стыковые магнитные системы

- При стыковой конструкции **стержни и ярма собирают отдельно**, далее насаживаются обмотки на стержни, а затем сверху приставляют верхнее ярмо.
- *Чтобы избежать замыкания пластин, между **стыкующимися частями магнитопровода помещают прокладки из электрокартона.***
- После установки верхнего ярма всю конструкцию прессуют и стягивают вертикальными шпильками.
- Стыковая конструкция существенно облегчает сборку, так как для насадки обмоток достаточно снять верхнее ярмо.
- Однако необходимость в громоздких стяжных устройствах, а также в механической обработке стыкующихся поверхностей стержней и ярм (что необходимо для уменьшения магнитного сопротивления) привела к тому, что **для силовых трансформаторов стыковую конструкцию магнитопроводов не применяют.**
- «**Косой стык**» в конструкции магнитопроводов позволяет заметно уменьшить потери холостого хода за счет некоторого усложнения в изготовлении.

## Поперечное сечение стержня и ярма

- Поперечное сечение стержня шихтованной магнитной системы, рассчитанного на размещение обмоток, имеющих форму круговых цилиндров, обычно имеет форму ступенчатой симметричной фигуры, вписанной в окружность.
- Поперечное сечение ярма, на котором обмотки не располагаются, может иметь такую же или более простую, например, прямоугольную форму.



***а, в* – многоступенчатая; *б* – с тремя ступенями сечение стержня; *г* – прямоугольная.**

Цифрами показано соотношение сечений пакетов стержня и ярма.

## Термины

- **Пластина магнитной системы** - пластина из электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, являющаяся элементом магнитной системы трансформатора.

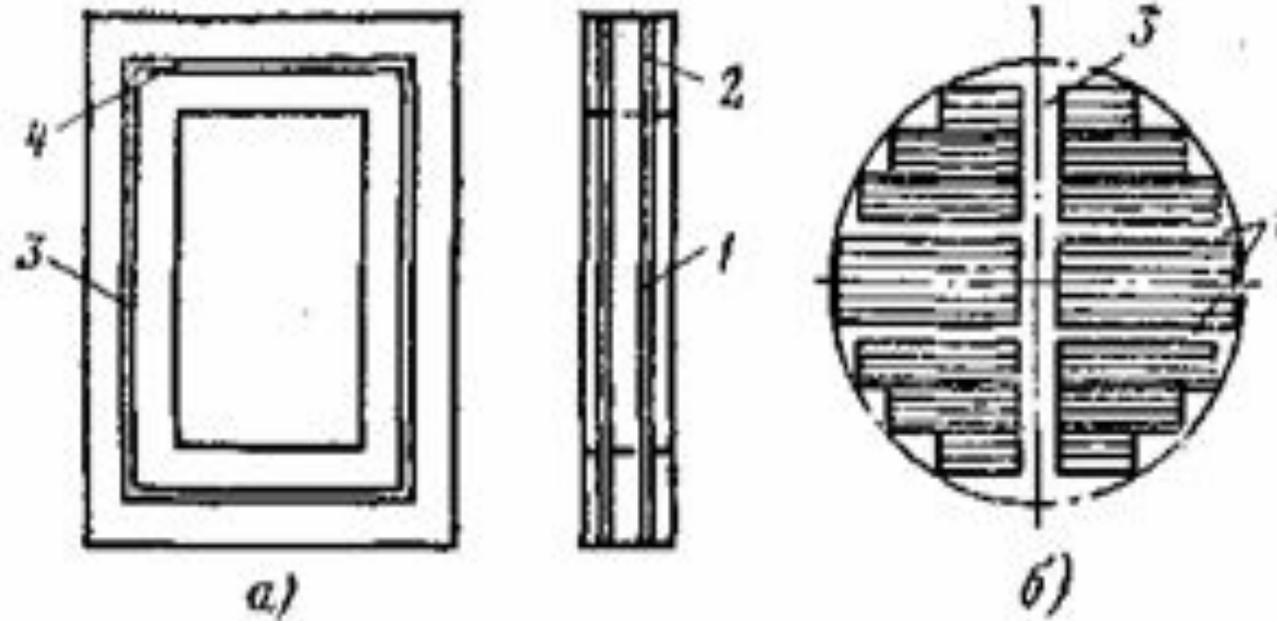
---

- Примечание. В некоторых конструкциях магнитных систем пластина при сборке может подвергаться изгибу по заданному профилю.
- **Пакет пластин** - стопа пластин одного размера в стержне или ярме магнитной системы.
- Примечание. Пакет может состоять из двух частей, разделенных каналом.
- **Число ступеней в стержне (ярме)** - число пакетов пластин в половине поперечного сечения стержня (ярма) магнитной системы с плоской шихтовкой.
- Примечание. Аналогично определяется число ступеней в навитой магнитной системе.

## Конструкции стержней с охлаждающими каналами

- **Стержни диаметром до 0,36 м** обычно достаточно **хорошо охлаждаются маслом**, омывающим их наружную поверхность.
- **При диаметре от 0,36 м и выше** для обеспечения надежного охлаждения внутренних частей стержня между его пакетами *делаются охлаждающие каналы.*
- Эти каналы могут быть ***продольными*** по отношению к пластинам стержня или ***поперечными.***
- Продольные каналы стержня продолжаются и в ярах.
- Вертикальный поперечный канал стержня обычно переходит в горизонтальный поперечный канал ярма, разделяя магнитную систему на отдельные «рамы».
- В стержнях обычно делают не более одного поперечного канала.

## Схема двухрамной магнитной системы однофазного трансформатора



**а — расположение каналов в системе; б — сечение стержня; 1 и 2—продольные каналы стержня и ярма; 3 и 4 —поперечные каналы**

## Ориентировочное число продольных по отношению к листам и поперечных охлаждающих каналов

### Масляные трансформаторы

Мощность трансформатора S, кВ·А	До 4000	6300-16000	25 000-32000	40 000 — 80000
Ориентировочный диаметр стержня d, м	До 0,34	0,36-0,48	0,50-0,60	0,63-0,75
Число продольных каналов	-	1	2	3

### Сухие трансформаторы

Мощность трансформатора S, кВ·А	До 400	30 - 1000	1600
Ориентировочный диаметр стержня d, м	До 0,22	0,24 - 0,25	0,28 - 0,32
Число продольных каналов	-	1	2

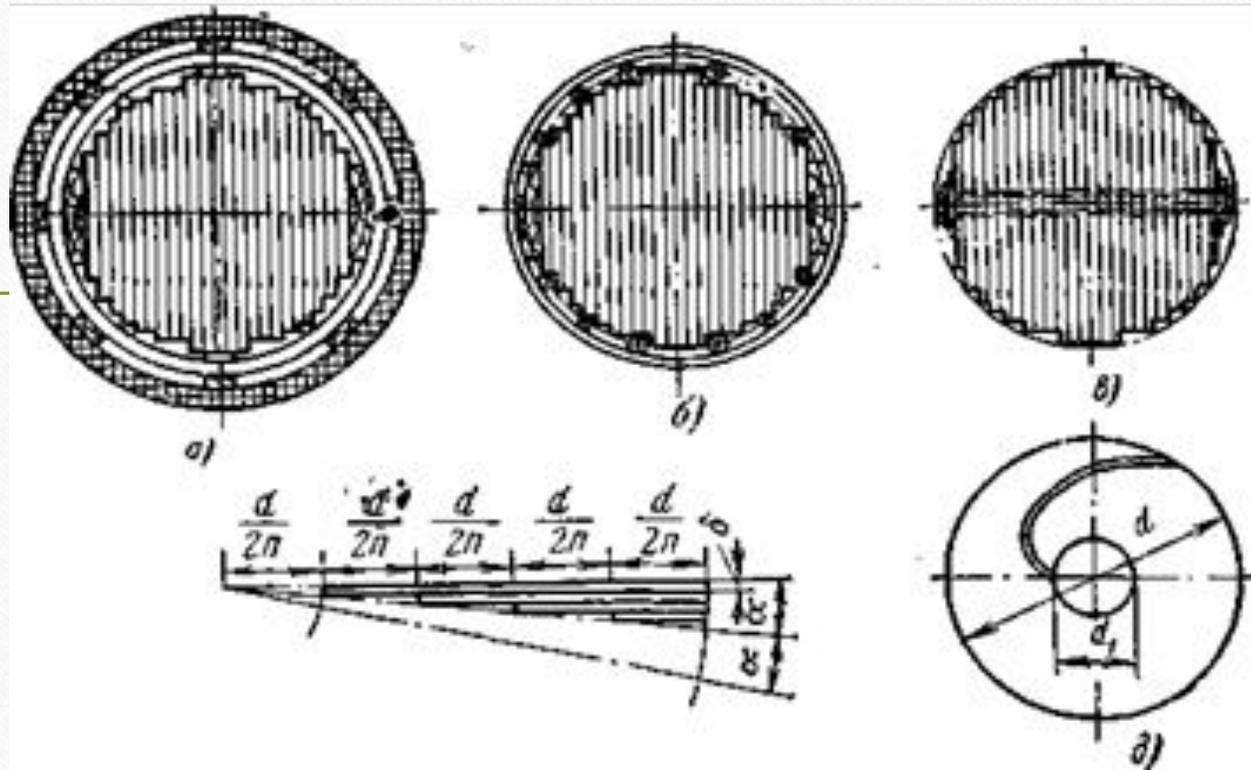
## Шкала нормализованных значений диаметра стержня

- Для диаметров стержней силовых трансформаторов принят стандарт, который содержит следующие нормализованные диаметры, м: 0,08; 0,085; 0,09; 0,092; 0,095; 0,10; 0,105; 0,11; 0,115; 0,12; 0,125; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,20; 0,21; 0,22; 0,225; 0,23; 0,24; 0,245; 0,25; 0,26; 0,27; 0,28; 0,29; 0,30; 0,31; 0,32; 0,33; 0,34; 0,35; 0,36; 0,37; 0,38; 0,39; 0,40; 0,42; 0,45; 0,48; 0,50; 0,53; 0,56; 0,60; 0,63; 0,67; 0,71; 0,75 - *для магнитных систем без поперечных каналов.*
- 0,80; 0,85; 0,875; 0,90; 0,925; 0,95; 0,975; 1,00; 1,03; 1,06; 1,12; 1,15; 1,18; 1,22; 1,25; 1,28; 1,32; 1,36; 1,40; 1,45; 1,50 - *для магнитных систем, имеющих поперечные охлаждающие каналы.*

## Конструкции магнитных систем силовых трансформаторов

- Магнитная система трансформатора собирается из пакетов пластин тонколистовой электротехнической стали толщиной **0,27 мм; 0,3 мм; 0,35 мм**.
- Стержни и ярма шихтованной магнитной системы должны быть стянуты и скреплены так, чтобы остов представлял собой **достаточно жесткую конструкцию как механическую основу трансформатора**.
- Прессовка стержней может осуществляться различными способами:
  - при мощности до **630 кВА** и диаметре стержня до **22 см** **прессовка осуществляется путем забивки деревянных клиньев реек и планок между стержнями и обмоткой** или ее жестким изоляционным бумажно-бакелитовым цилиндром.
  - стержни трансформаторов мощностью от **1000 кВА** и выше, при диаметре **более 22 см**, **стягиваются бандажами из стеклоленды**, расположенными по высоте стержня на расстоянии 12–15 см один от другого.
- Возможна также **стяжка стержней бандажами из стальной ленты** на расстоянии 24 см друг от друга. Эти бандажи должны замыкаться пряжками и заземляться во избежание накопления на них электрических зарядов.

## Различные способы сборки и прессовки стержня



а — путем расклинивания с жестким цилиндром обмотки НН; б — бандажу из стеклоленты; в — сквозными стяжными шпильками;

**сборка стержня:** г — из радиально расположенных пластин; д — из пластин эвольвентной формы.

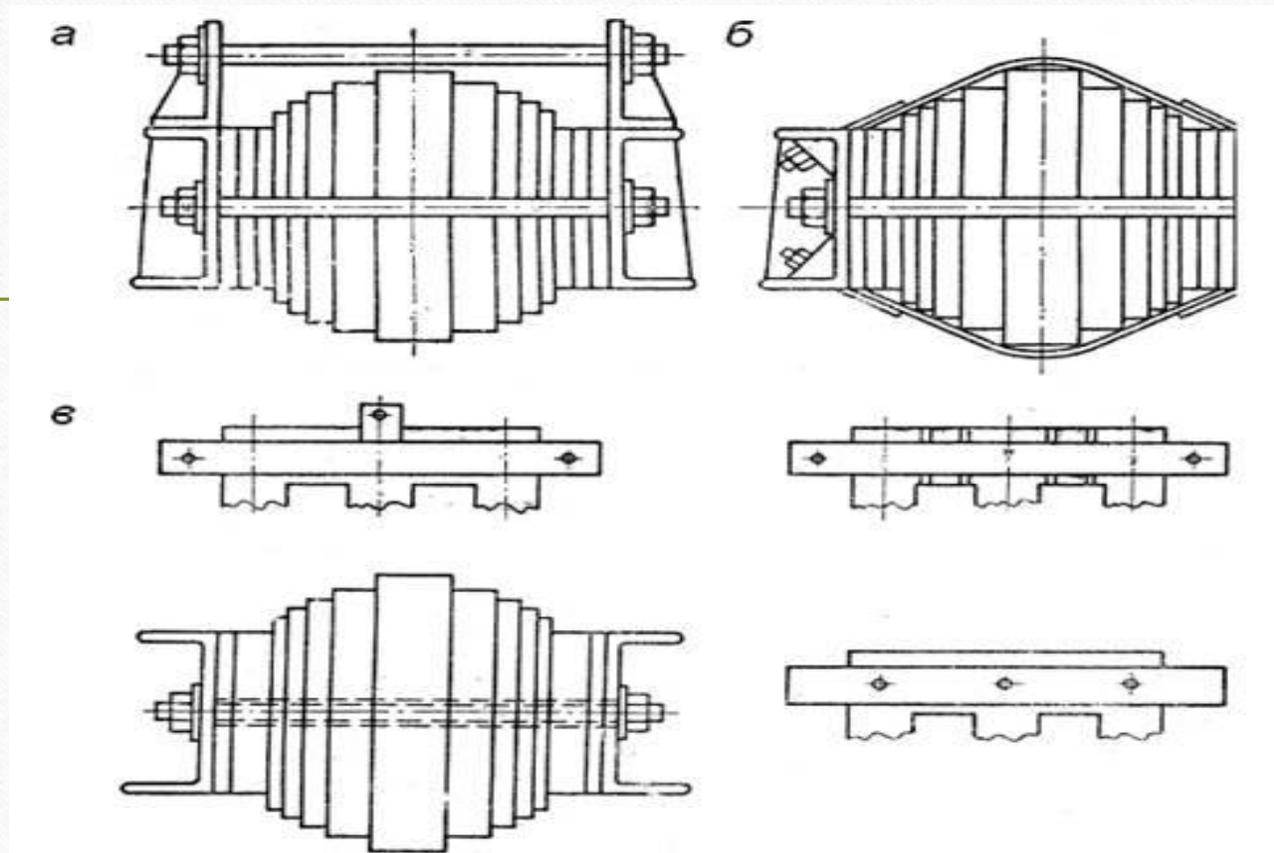
## Различные способы сборки и прессовки стержня

- **Конструкция прессовки стержня шпильками**, проходящими сквозь пластины всех его пакетов (рис. в), вынужденно применявшаяся в течение ряда лет в магнитных системах из листовой стали, не обеспечивает равномерного распределения силы прессовки между пакетами, способствует появлению «веера», т. е. расхождения пластин на краях пакетов и требует наличия на заводе большого прессового и инструментального хозяйства.
- При такой конструкции прессовки стержней и ярм увеличиваются удельные потери в стали и уменьшается ее магнитная проницаемость.
- Поэтому в магнитных системах трансформаторов, изготовляемых из рулонной холоднокатаной стали, она не применяется, но используется в конструкциях реакторов.

## Различные способы сборки и прессовки стержня

- Сечение стержня может быть образовано не только набором пакетов плоских пластин (рис. а—в), но также и **радиальной шихтовкой плоских пластин** (рис. г) или набором пластин, изогнутых по форме **цилиндрической эвольвентной поверхности** (рис. д).
- Оба эти способа сборки магнитной системы предусматривают **стыковую конструкцию остова с отдельно собираемыми стержнями и ярмами**. Ярма наматываются из рулонной стали или выполняются в виде набора плоских пакетов.
- Конструкция с пластинами **эвольвентной формы** удобна тем, что каждый стержень собирается из пластин одного размера. Ширина пластины (длина эвольвентной линии) зависит только от диаметров стержня — внутреннего  $d_1$  и внешнего  $d$ .
- Надлежащая прессовка стержня для этих двух конструкций может быть достигнута путем **стяжки бандажами из стальной ленты или стеклоленты**.

## Способы прессовки ярма ярмовыми балками



***а*** – внешними шпильками; ***б*** – стальными полубандажами; ***в*** – сквозными шпильками

## Способы прессовки ярма ярмовыми балками

- Ранее при изготовлении магнитопровода из горячекатаной стали стяжка ярма осуществлялась ярмовыми балками, стянутыми шпильками, проходящими сквозь ярмо и изолированными от стали ярма и балок.
- Это оказалось не рациональным, так как необходимо было выполнить отверстия для шпилек в пластинах ярма и стержня.
- Поэтому в магнитных системах современных трансформаторов мощностью *до 6300 кВА шпильки, стягивающие ярмовые балки, выносятся за пределы ярма.*
- В трансформаторах большой мощности **от 10000 кВА** и выше ярмо прессуется при помощи стальных полубандажей, стягивающих две ярмовые балки.
- Вертикальные шпильки, стягивающие ярмовые балки, располагаются поблизости от наружных поверхностей обмоток ВН и должны быть надежно изолированы.

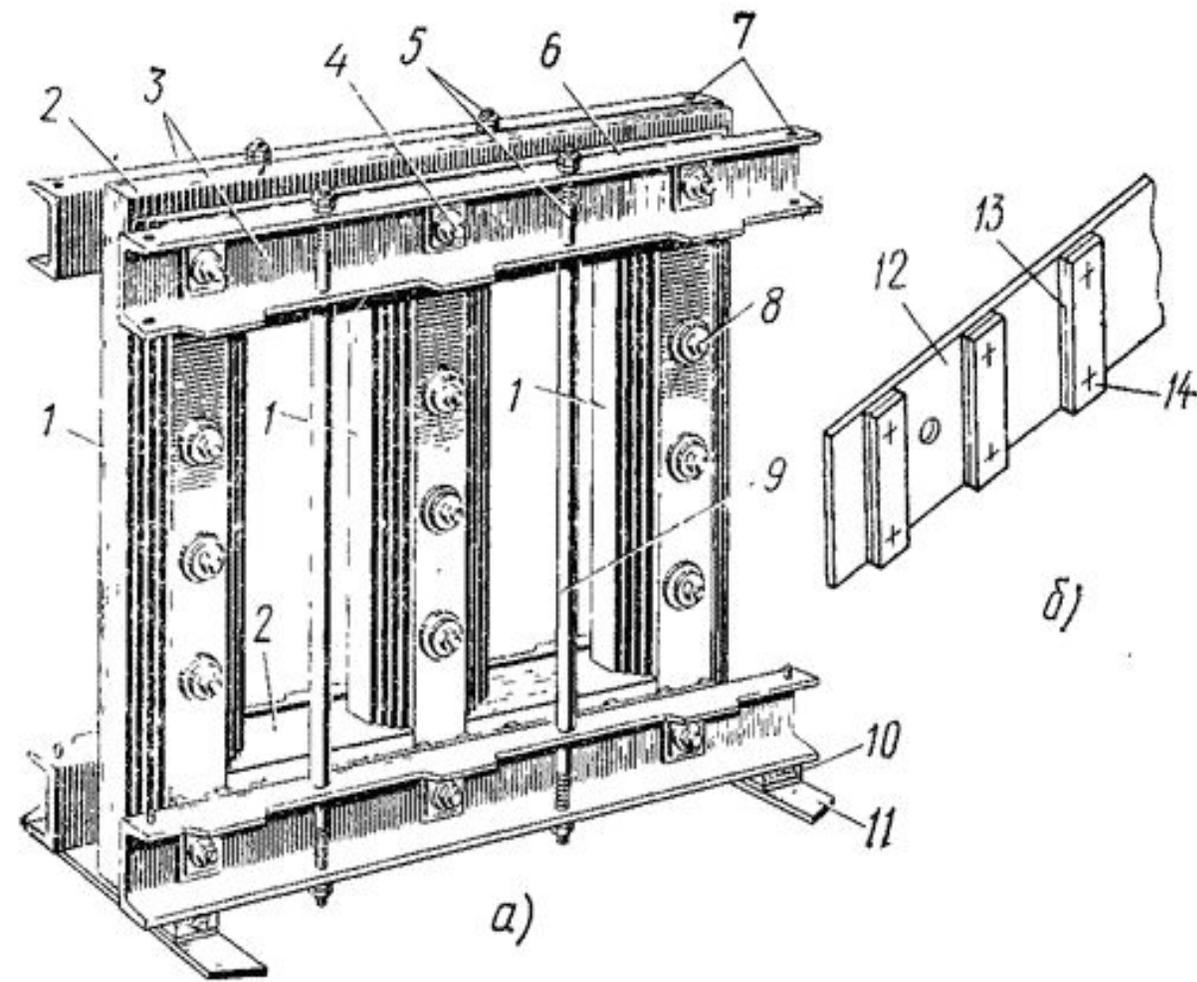
## Выбор способа прессовки стержней и ярм для современных трансформаторов

Мощность трансформатора $S$ , кВА	Прессовка стержней	Прессовка ярм	Форма сечения ярма
25–100	Расклиниванием с обмоткой	Балками, стянутыми шпильками, расположенными вне ярма (рис. <i>a</i> )	3–5 ступеней
160–630			С числом ступеней на одну-две меньше числа ступеней стержня
1000–6300	Бандажами из стеклоленты	Балками, стянутыми стальными полубандажами (рис. <i>б</i> )	

## Остов трансформатора

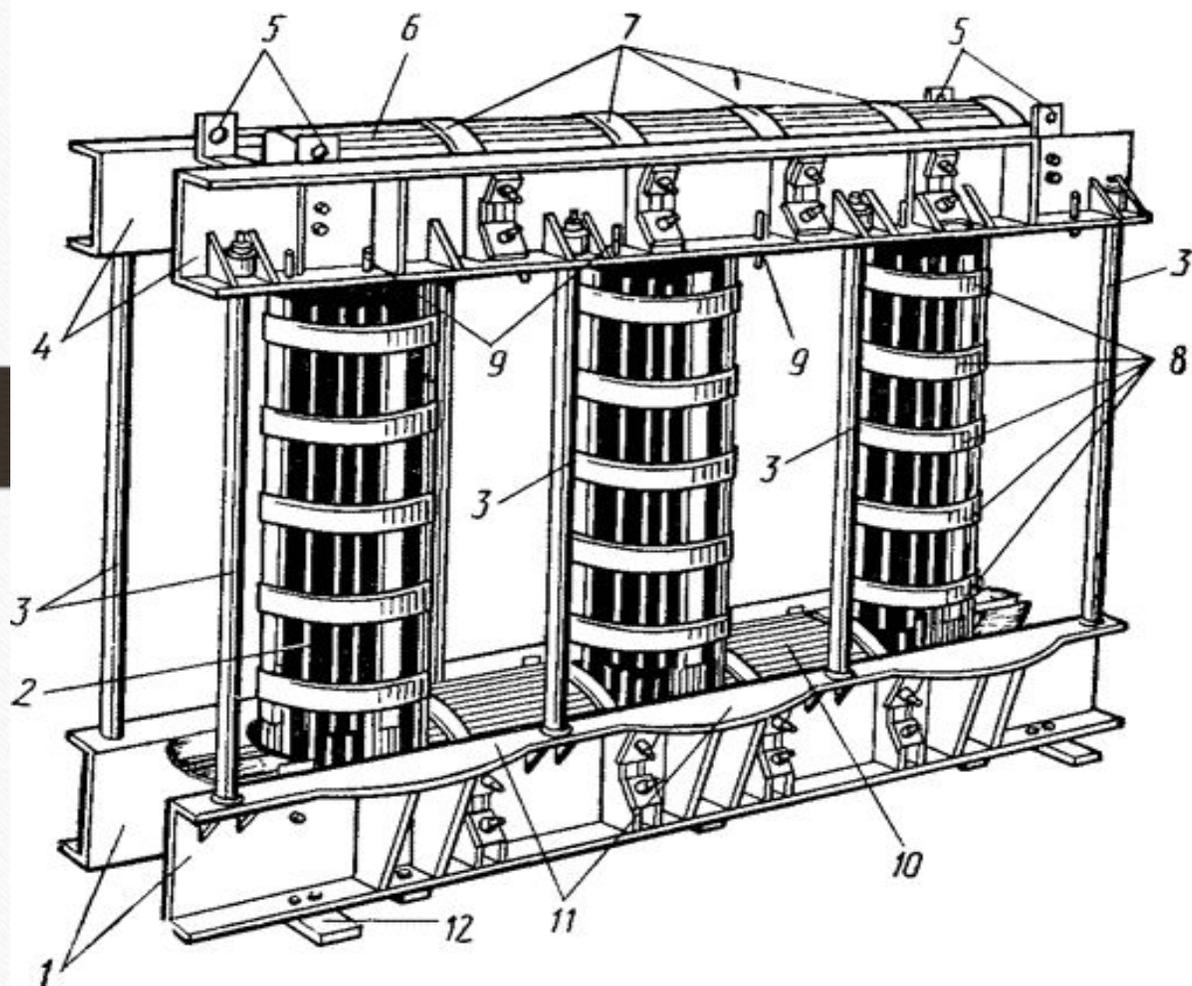
- Для того чтобы магнитная система, собранная из массы пластин тонколистовой стали, обладала достаточной устойчивостью, могла выдерживать механические силы, возникающие между обмотками при коротком замыкании, и не разваливалась при подъеме остова или активной части, ее верхнее и нижнее ярма должны быть надежно соединены механически.
- **Остов** - единая конструкция, включающая в собранном виде магнитную систему со всеми деталями, служащими для ее соединения и для крепления обмоток.
- На остове в процессе дальнейшей сборки устанавливаются обмотки и крепятся отводы, т. е. проводники, предназначенные для соединения обмоток трансформатора с переключателями, вводами и другими токоведущими частями.

## Остов трехфазного трансформатора со шпилечной стяжкой магнитной системы



Стержни 1 стянуты шпильками 8, ярма 2 — шпильками 4 и ярмовыми балками 3. Ярмовые балки создают равномерную прессовку ярм и являются опорой для обмоток. Отверстия 7 на верхних ярмовых балках предназначены для крепления подъемных шпилек; вертикальные шпильки 5, изолированные бумажно-бакелитовыми трубками 9 связывают верхние ярмовые балки с нижними, а также служат для прессовки обмоток. Остов в дно бака опирается пластинами 11, которые изолированы от активной стали прокладками 10. Нарушение электрической изоляции между ними может привести к перегреву, увеличению потерь и повреждению трансформатора. Для изоляции балок от ярма между ними помещают электрокартонную прокладку 6.

## Общий вид остова с бесшпильчатой магнитной системой трехфазного трансформатора III габарита



1 — нижние ярмовые балки, 2 — стержень, 3 — вертикальные стяжные шпильки, 4 — верхние ярмовые балки, 5 — подъемные планки, 6 — верхнее ярмо, 7 — стальные полубандажи, 8 — стеклобандажи, 9 — винты прессовки обмоток, 10 — нижнее ярмо, 11 — полки для опоры обмоток, 12 — опорные пластины

## Характеристики стали

- Пластины электротехнической стали, заготовленные для сборки магнитной системы, во избежание возникновения между ними вихревых токов должны быть надежно изолированы одна от другой.
- Современное нагревостойкое электроизоляционное покрытие обеспечивает достаточно прочную и надежную изоляцию пластин при высоком коэффициенте заполнения сечения пакета пластин сечением чистой стали. При мощностях трансформаторов, превышающих 100000 кВ•А, иногда усиливают изоляцию пластин путем нанесения поверх нагревостойкого покрытия одного слоя лаковой пленки.
- Лаковая изоляция наносится в виде пленки на обе стороны пластины (лак КФ-965, ГОСТ 15030-78, быстрой горячей огневой сушки) с последующим испарением и выгоранием растворителя, и запеканием пленки в огне газовых горелок при 450 - 550 °С.
- Толщина пленки около 0,01 мм. Она дает хорошую изоляцию пластин, высокий коэффициент заполнения сечения стержня, имеет высокую теплопроводность, достаточно прочна в механическом отношении и не повреждается при сборке.
- При отсутствии на стали нагревостойкого покрытия наносятся два или три слоя пленки.

## Активное сечение стержня

- Активное сечение стержня определяется *коэффициентом заполнения сталью*  $k_c$ , равным отношению активного сечения  $\Pi_c$  к площади круга диаметром  $d$ .
- Коэффициент заполнения сечения стержня (или ярма) сталью  $k_3$ , равный отношению чистой площади стали в сечении — ~~активного сечения  $\Pi_c$  (или  $\Pi_{\text{я}}$ )~~ к площади ступенчатой фигуры  $\Pi_{\text{ф.с}}$  т. е.  $k_3 = \Pi_c / \Pi_{\text{ф.с}}$ , желательно иметь наиболее высоким, потому что понижение этого коэффициента ведет к увеличению массы стали магнитной системы и металла обмоток.
- Коэффициент  $k_c$  равен произведению двух коэффициентов – коэффициента заполнения сечения стержня  $k_3$  и коэффициента заполнения площади круга  $k_{\text{кр}}$ .
- $k_{\text{кр}} = 4\Pi_{\text{фс}} / (\pi d^2)$ ;  $\Pi_{\text{фс}} = k_{\text{кр}} \pi d^2 / 4$ ;
- $k_3 = 4\Pi_c / (k_{\text{кр}} \pi d^2)$ ;  $\Pi_c = k_{\text{кр}} k_3 \pi d^2 / 4$ ;
- $\Pi_c = k_c \pi d^2 / 4$ ;
- $k_c = k_{\text{кр}} k_3$

## Сравнение стали толщиной 0,35, 0,30 и 0,27 мм

Толщина, мм	Марка стали	Относительные удельные потери, %	Относительная цена, %	Относительное число пластин в пакетах равной толщины, %	$K_3$
0,35	3404; 3405	100; 94	100; 104,1	100	0,97
0,30	3404; 3405	94; 87,5	104,1; 108,2	115	0,96
0,27	3405; 3406	86,5; 81,3	109,6; 112,7	127	0,95