

Электрические трансформаторы

КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основные сведения

Основным элементом обмотки трансформатора является **ВИТОК** — электрический проводник или несколько параллельно соединяемых проводников, однократно охватывающих часть магнитной системы.

Ток витка совместно с токами других витков и других частей трансформатора, в которых возникает электрический ток, создает магнитное поле трансформатора.

Под воздействием этого поля в каждом витке наводится ЭДС.

Обмоткой называется совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведенные в витках, с целью получения высшего, среднего или низшего напряжения трансформатора или с другой целью.

Обмотки высшего, среднего и низшего напряжения предназначены для преобразования электрической энергии и **являются основными обмотками**.

Кроме них, в силовом трансформаторе могут быть и **вспомогательные обмотки**, предназначенные для компенсации отдельных частей магнитного поля, дополнительного подмагничивания отдельных частей магнитной системы и других целей.

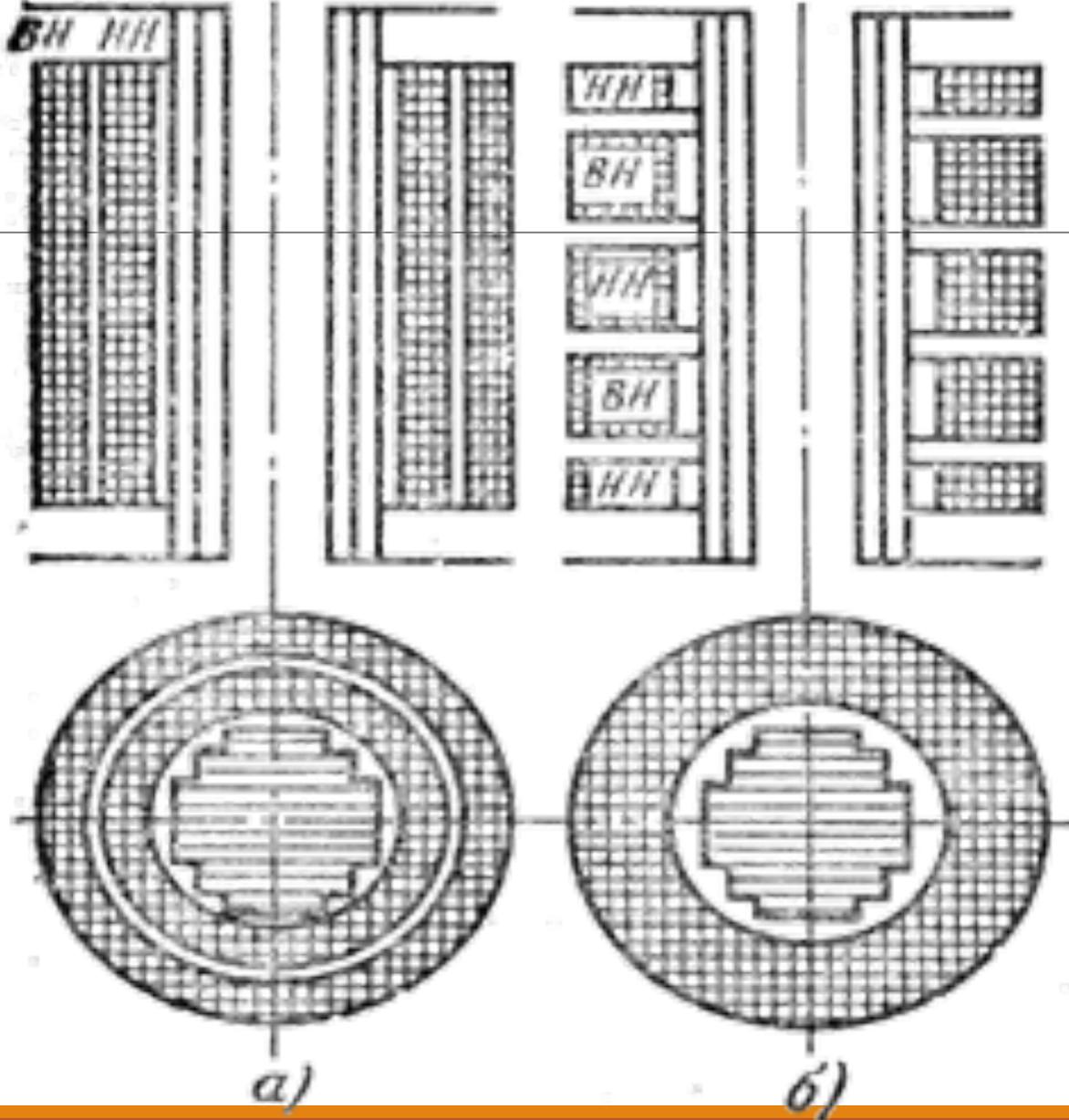
Классификация обмоток трансформатора

- Обмотки трансформаторов различают по назначению, способу взаимного расположения и форме.
- По способу расположения их на стержне обмотки трансформаторов подразделяются на **концентрические и чередующиеся.**
- **Концентрическими обмотки** называются в том случае, когда обмотки НН и ВН (а в трехобмоточных трансформаторах и обмотки СН) выполняются каждая **в виде цилиндра** и располагаются на стержне концентрически одна относительно другой (рис. а).
- **Высоты (осевые размеры)** обеих обмоток, как правило, делаются **одинаковыми.**
- При выполнении обмоток ВН и НН с различными высотами приходится считаться со значительным возрастанием осевых механических сил, возникающих в обмотках при коротком замыкании трансформатора, тем больших, чем больше разность высот обмоток.
- При концентрическом расположении **обмотка НН** обычно **располагается внутри**, а **обмотка ВН — снаружи.**

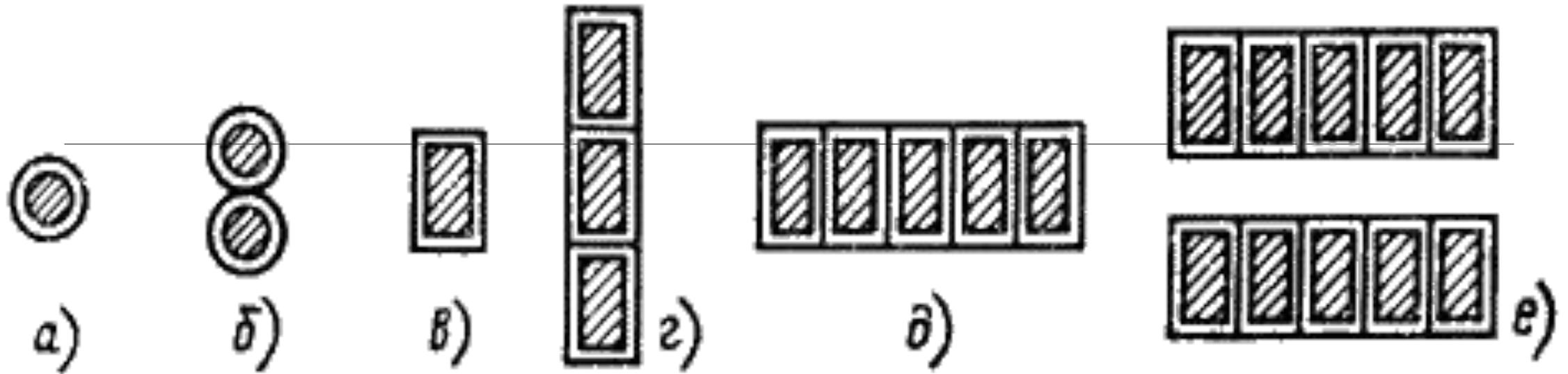
Классификация обмоток трансформатора

- При расположении обмотки ВН снаружи упрощается вывод от нее ответвлений для регулирования напряжения, а также уменьшаются размеры внутренних изоляционных каналов между внутренней обмоткой и стержнем.
- Обмотки называются чередующимися, если обмотки ВН и НН выполняются в виде невысоких цилиндров с одинаковыми или почти одинаковыми средними диаметрами и располагаются на стержне одна над другой в осевом направлении стержня.
- Изменение числа чередующихся групп позволяет также в широких пределах **изменять реактивную составляющую напряжения короткого замыкания** — увеличивающуюся с уменьшением числа групп и уменьшающуюся с его увеличением.
- Для уменьшения радиальных механических сил стараются выдержать для обеих обмоток одинаковые внутренние диаметры и радиальные размеры.
- В настоящее время подавляющее большинство всех силовых трансформаторов общего назначения и специальных выполняется с **концентрическими обмотками**.
- **Чередующиеся обмотки** иногда находят применение в специальных типах трансформаторов, предназначенных **для питания электропечей**.

Концентрические (а) и чередующиеся (б) обмотки двухобмоточного трансформатора



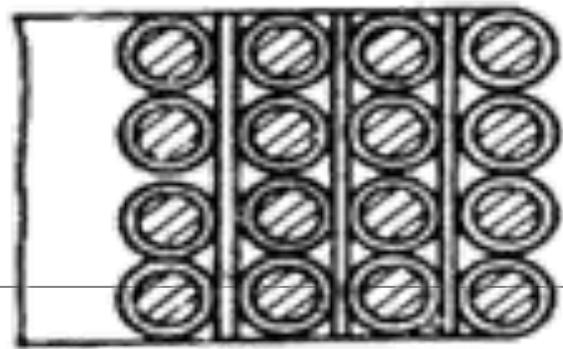
Формы сечения витка обмотки при различном числе параллельных проводов



- В зависимости от тока нагрузки виток может быть выполнен одним проводом круглого сечения, или проводом прямоугольного сечения, или, при достаточно больших токах, группой параллельных проводов круглого или, чаще, прямоугольного сечения.
- На рис. представлены различные варианты поперечных сечений одного витка обмотки при различных токах нагрузки.
- **Ряд витков, намотанных на цилиндрической поверхности, называется слоем.**
- В некоторых типах обмоток слой может состоять из нескольких десятков или сотен витков, в других — из нескольких витков или даже из одного витка.

Поперечные сечения различных типов катушек

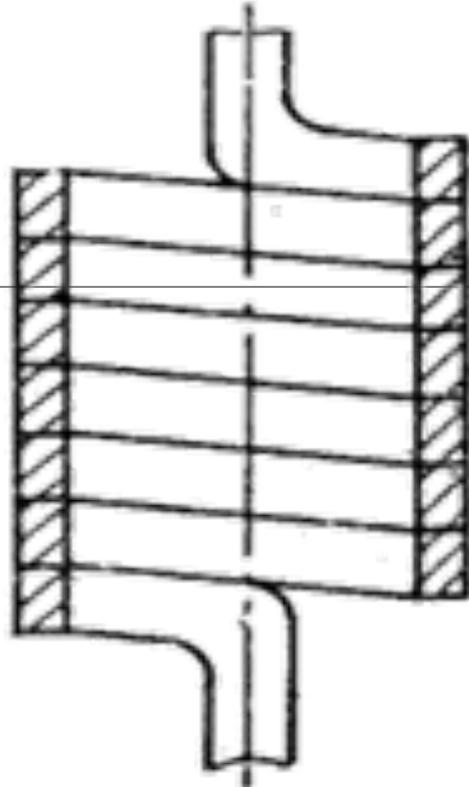
- Отдельные витки обмотки группируются в катушки.
- **Катушкой называется группа последовательно соединенных витков обмотки,** конструктивно объединенная и отделенная от других таких же групп или от других обмоток трансформатора.
- Обмотка стержня может состоять из одной, двух или многих катушек.
- Катушка может состоять из ряда слоев или только из одного слоя витков.
- Число витков в катушке может быть различным — как целым, так и дробным, однако должно быть больше единицы.
- Для обеспечения надлежащей электрической прочности обмотки между ее витками, катушками, а также между обмоткой и другими частями трансформатора должны быть выдержаны определенные изоляционные расстояния, зависящие от рабочего напряжения и гарантирующие обмотку от пробоя изоляции как при рабочем напряжении, так и при возможных перенапряжениях.
- В этих промежутках могут быть установлены изоляционные конструкции или детали из твердого диэлектрика либо промежутки могут быть заполнены только твердым диэлектриком — кабельной бумагой, электроизоляционным картоном и т. д. или только изолирующей средой — маслом, воздухом и т. д.



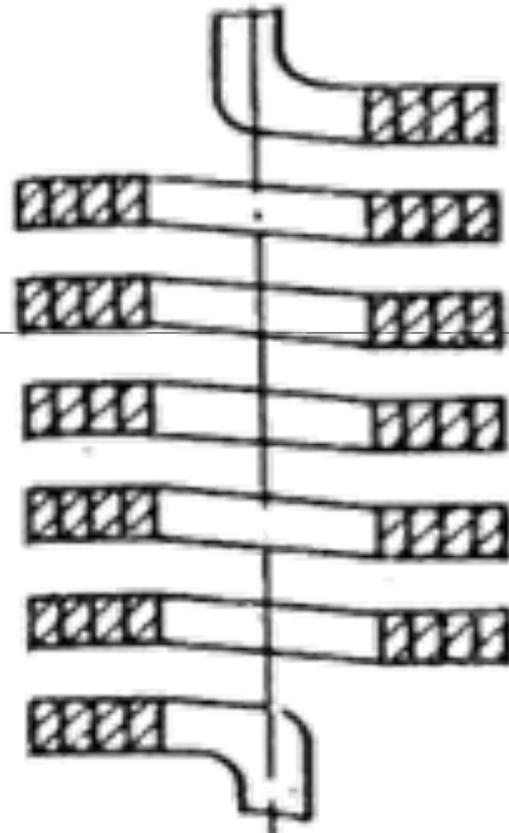
а)



б)



в)



г)

а - катушка из шестнадцати витков; б - катушка из шести витков; в - катушка из семи витков; г - катушка из шести витков (четыре параллельных провода)

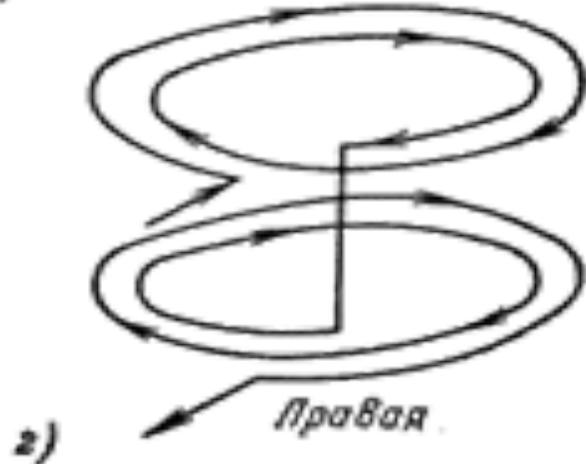
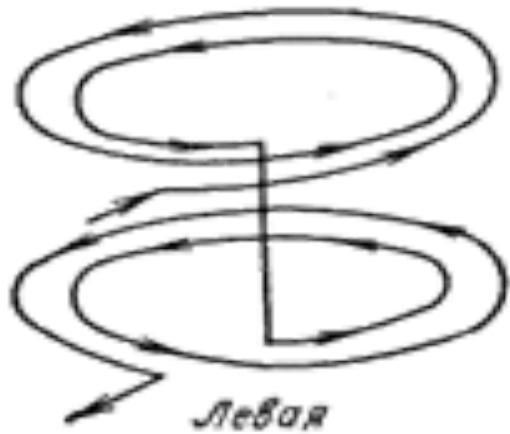
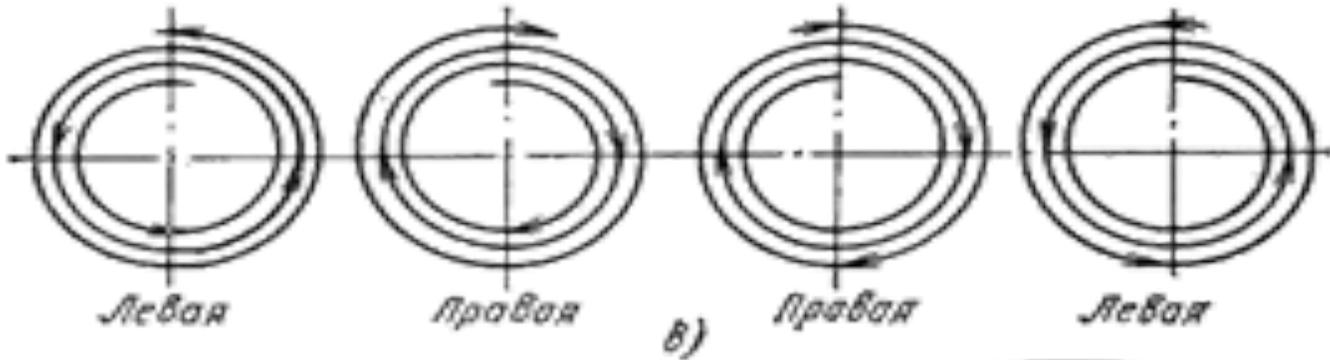
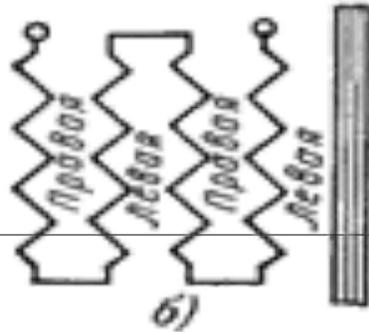
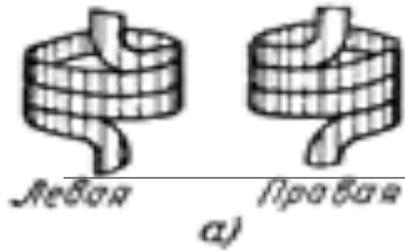
Охлаждение обмоток

- Для нормального охлаждения между обмоткой и другими частями трансформатора, между катушками, в некоторых конструкциях и между витками делают масляные или воздушные охлаждающие каналы.
- В одних случаях охлаждающие каналы обеспечивают одновременно и надежную изоляцию обмотки, в других — для усиления изоляции применяются специальные изоляционные детали — простые и угловые шайбы, изоляционные цилиндры, перегородки и т. д.
- Во всех типах обмоток принято различать **осевое и радиальное направления**.
- **Осевым** считается направление, параллельное оси стержня трансформатора, на котором устанавливается данная обмотка.
- **Радиальным** считается направление любого радиуса окружности обмотки.
- В силовых трансформаторах с вертикальным расположением стержней **осевое направление совпадает с вертикальным, а радиальное — с горизонтальным**.
- В этом смысле принято говорить также об **осевых и радиальных — вертикальных и горизонтальных — каналах обмоток**.

Виды обмоток по направлению намотки

- По направлению намотки подобно резьбе винта **различают обмотки правые и левые.**
- Однослойные обмотки, имеющие в одном слое более одного витка остаются левыми или правыми в зависимости от того, как они намотаны, но независимо от того, какой конец — верхний или нижний — считается входным.
- В обмотках, состоящих из нескольких таких слоев, с переходами из слоя в слой направление намотки слоев будет чередоваться.
- Если первый (внутренний) слой левый, то все другие нечетные слои также будут левыми, а все четные — правыми.
- Для таких обмоток за начало при определении направления намотки обычно принимается начало первого (внутреннего) слоя и направление намотки всей обмотки считается по направлению намотки этого слоя.
- Правильный выбор направления намотки имеет существенное значение для получения заданной группы соединения обмоток, а в однофазных трансформаторах — также для правильного соединения частей обмоток, расположенных на разных стержнях.
- Большинство обмоток трансформаторов обычно выполняется левой намоткой, более удобной для обмотчика, работающего в основном правой рукой.

Обмотки левой и правой намоток



а – цилиндрическая
однослойная;

б – цилиндрическая
многослойная;

в – одинарные катушки
катушечной обмотки;

г – двойные катушки
катушечной обмотки.

Виды проводников для обмоток и их изоляция

- Обмотки масляных и сухих трансформаторов изготавливаются из:

- **медных и алюминиевых обмоточных проводов;**

- **медной и алюминиевой ленты или фольги.**

- Медные и алюминиевые провода могут иметь *эмалевую, хлопчатобумажную или бумажную изоляцию класса нагревостойкости А.*
- Провода, предназначенные для обмоток сухих трансформаторов, могут также иметь изоляцию более высоких классов нагревостойкости из стекловолокна, кремнийорганического лака и т. д.
- Например, **медный провод марки ПСД** с изоляцией из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком или компаундом **класса нагревостойкости F (155 °C)** и **марки ПСДК** с такой же стеклянной изоляцией, но с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком **класса нагревостойкости H (180 °C)**.
- Собственная изоляция провода обычно обеспечивает достаточную электрическую прочность изоляции между соседними витками.

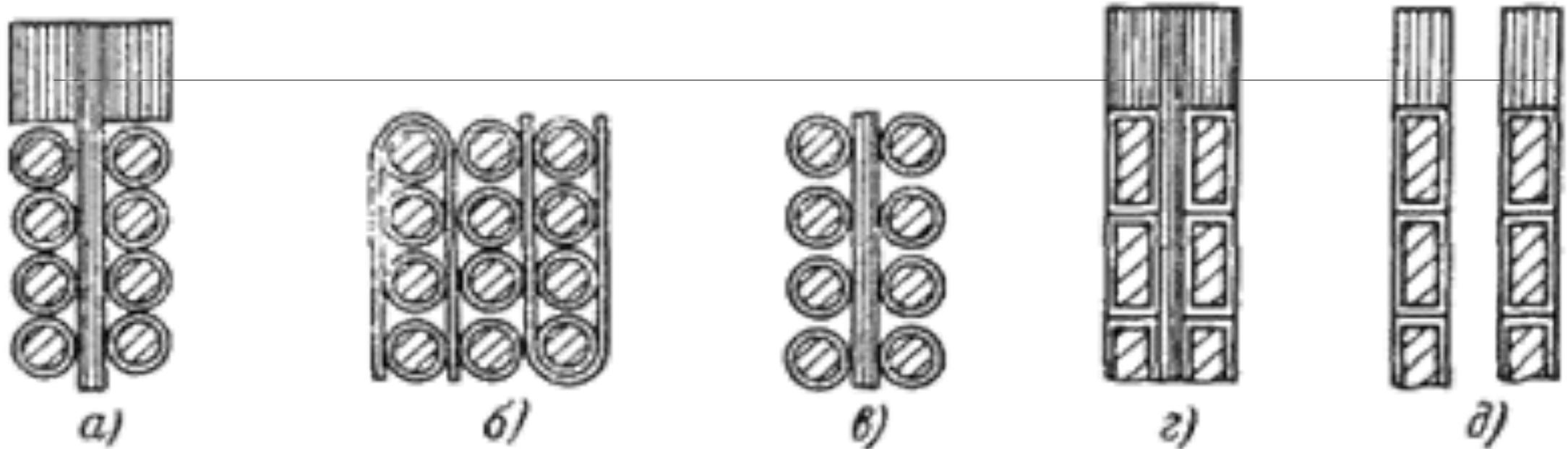
Виды проводников для обмоток и их изоляция

- В трансформаторах мощностью **от 25 до 1000 кВА** в качестве обмоточного материала для обмоток низшего напряжения при напряжениях до 690 В находит применение ***неизолированная алюминиевая лента***.
- В качестве изоляции между витками служит полоса кабельной бумаги, вматываемой при намотке обмотки.
- В качестве проводникового материала для ***обмоток высшего напряжения*** силовых трансформаторов возможно применение ***неизолированной алюминиевой фольги***.
- Одним из важнейших требований, предъявляемых к обмоточному проводу, является требование определенного удельного электрического сопротивления.
- Для всех круглых и прямоугольных медных проводов это сопротивление при 20 °С для отрезка проволоки длиной 1 м с сечением 1 мм² должно быть не более **0,01724 Ом**.
- Для алюминиевого прямоугольного провода круглого провода диаметром 1,80 мм и более это сопротивление должно быть не более **0,0280 Ом**, а для круглого диаметром от 1,35 до 1,70 мм — не более **0,0283 Ом**.

Междуслойная изоляция

- В обмотках, состоящих из нескольких слоев круглого или прямоугольного провода, собственная изоляция витков может оказаться недостаточной, и возникает необходимость введения **добавочной изоляции между слоями**.
- Междуслойная изоляция может осуществляться:
 - *прокладкой между слоями витков обмотки полос кабельной или телефонной бумаги;*
 - *электроизоляционного картона;*
 - *созданием между слоями осевого масляного или воздушного канала, обеспечивающего как достаточную изоляцию, так и свободный доступ к обмотке охлаждающего масла, или воздуха, или другого теплоносителя.*
- Между витками, состоящими из нескольких параллельных проводов, в обмотках некоторых типов могут быть сделаны **радиальные (горизонтальные) каналы**, основное назначение которых состоит в том, чтобы обеспечить свободный доступ масла или воздуха для надлежащего охлаждения всех параллельных проводов витка.
- Эти каналы обеспечивают также надежную, с большим запасом изоляцию между витками.

Виды междуслойной изоляции

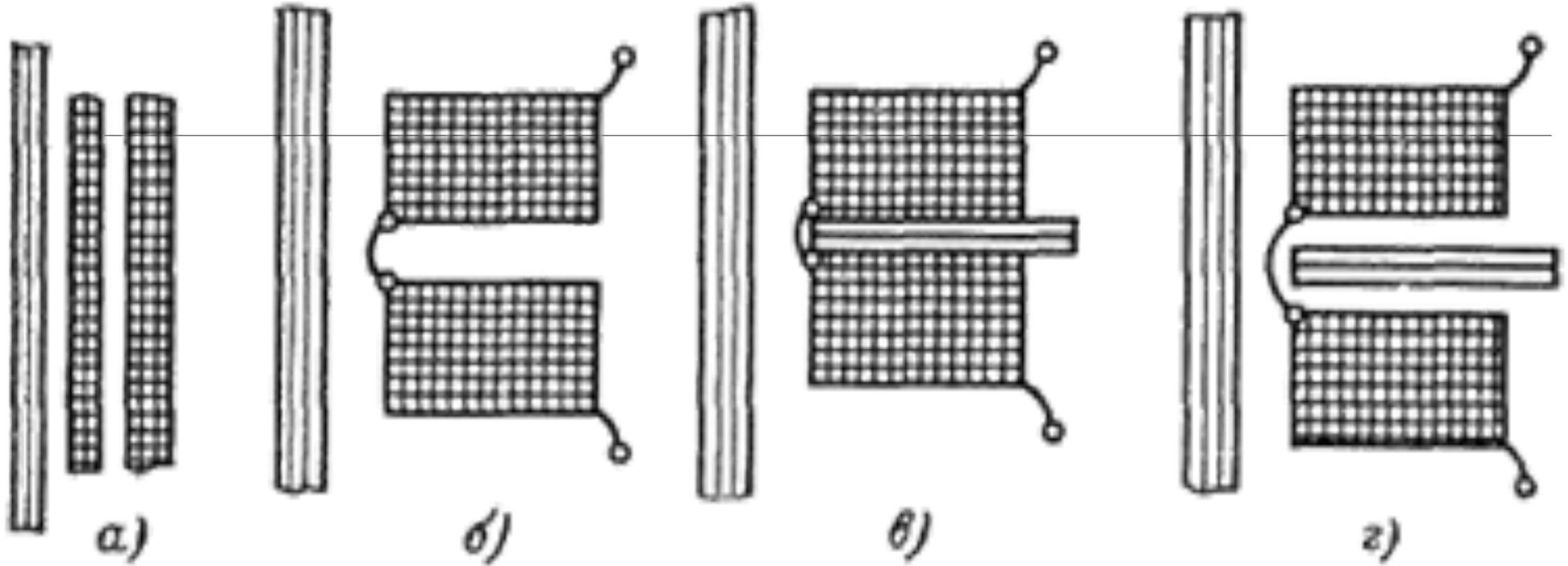


**а – кабельная бумага; б – кабельная или телефонная бумага;
в и г – картон электроизоляционный; г – масляный канал**

Междукатушечная изоляция

- При разделении обмотки на катушки возникает необходимость в надлежащей *междукатушечной изоляции*.
- Обычно *изоляция* между катушками выполняется *в виде радиальных или осевых каналов*, служащих для лучшего охлаждения обмотки.
- В трансформаторах мощностью на один стержень **до 110 кВА** *возможно* вообще *не делать радиальных междукатушечных каналов*.
- В обмотках трансформаторов **от 1000 до 6300 кВА** часто бывает *возможно заменить шайбами половину масляных каналов*.
- Такая замена вследствие малой толщины шайб (**1—2 мм**) по сравнению с масляными каналами (**4—6 мм**) позволяет получить некоторую экономию места по высоте (*осевому размеру*) обмотки.
- *Наружный диаметр междукатушечных шайб принимается обычно больше наружного диаметра катушки, для того чтобы удлинить путь возможного разряда по поверхности между катушками.*

Различные виды междукатушечной изоляции

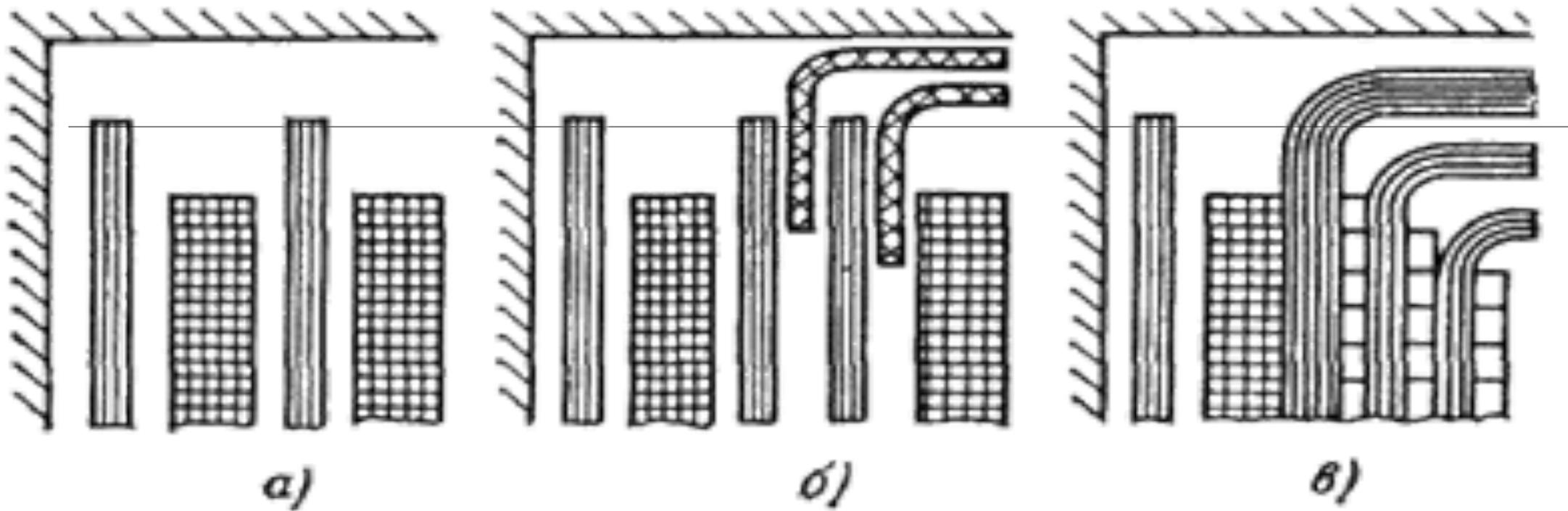


а – осевой канал; б – радиальный канал; в – шайбы; г – радиальный канал и шайбы

Изоляция между обмотками и обмоток от магнитной системы

- **Изоляция между обмотками**, а также обмоток от магнитной системы при рабочем напряжении **не выше 35 кВ** может быть осуществлена путем применения **изоляционных цилиндров**.
- Высота (*осевой размер*) цилиндра в этом случае делается больше высоты обмотки, чем удлиняется возможный путь разряда по поверхности между обмотками.
- В трансформаторах с рабочим напряжением **110 кВ и 220 кВ** и более для изоляции обмоток ВН обычно применяется **комбинация изоляционных цилиндров с угловыми шайбами**.
- Изоляционные цилиндры применяются:
 - **жесткие** бумажно-бакелитовые;
 - **мягкие**, составленные из намотанных один на другой листов электроизоляционного картона.
- **Угловые шайбы** также могут быть **жесткими** — **бумажно-бакелитовыми**, или прессованными **из электроизоляционного картона**, или **мягкими**, свернутыми из полос **картона**.

Изоляция между обмотками и обмоток от магнитной системы



а – изоляция при помощи жестких цилиндров; **б** – комбинация цилиндров и угловых шайб; **в** – отбортованные цилиндры из кабельной бумаги

КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК

- В современных трансформаторах первичную и вторичную обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой.
- При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки:
 - либо **концентрически** одну поверх другой;
 - либо в виде нескольких **дисковых катушек**, **чередующихся** по высоте стержня.
- В первом случае обмотки называют **концентрическими**, во втором — **чередующимися**.
- В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем **ближе к стержням располагают обмотку НН**, требующую меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а **снаружи — обмотку ВН**.
- При чередующихся обмотках всю обмотку подразделяют на симметричные группы, состоящие из одной или нескольких катушек ВН и расположенных по обе стороны от них двух или нескольких катушек НН.
- **Чередующиеся обмотки применяют** редко и в основном **для специальных трансформаторов**.

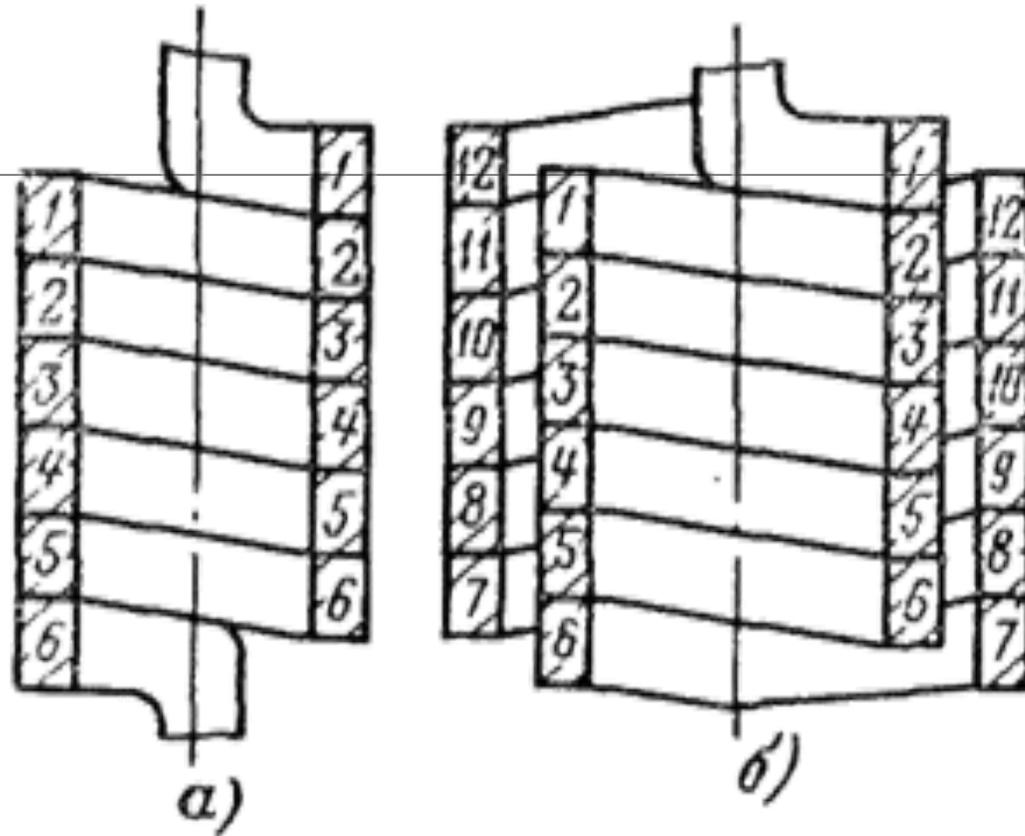
КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК

- Обмотки трансформаторов изготавливают из медных или алюминиевых проводов.
- При использовании **алюминия поперечное сечение провода берется примерно на 70% больше**, чем при использовании меди из-за большего удельного электрического сопротивления алюминия.
- В связи с этим габариты и масса трансформаторов с алюминиевыми обмотками больше, чем у трансформаторов с медными обмотками.
- При сравнительно **небольших мощностях** и токах обмотки выполняют **из изолированного провода круглого сечения**, при **больших мощностях** и токах применяют **провода прямоугольного сечения**.
- В ряде случаев обмотки наматывают из нескольких параллельных проводов.
- По конструкции обмотки подразделяют на:
 - **цилиндрические;**
 - **винтовые;**
 - **катушечные.**

Цилиндрические обмотки из прямоугольного провода

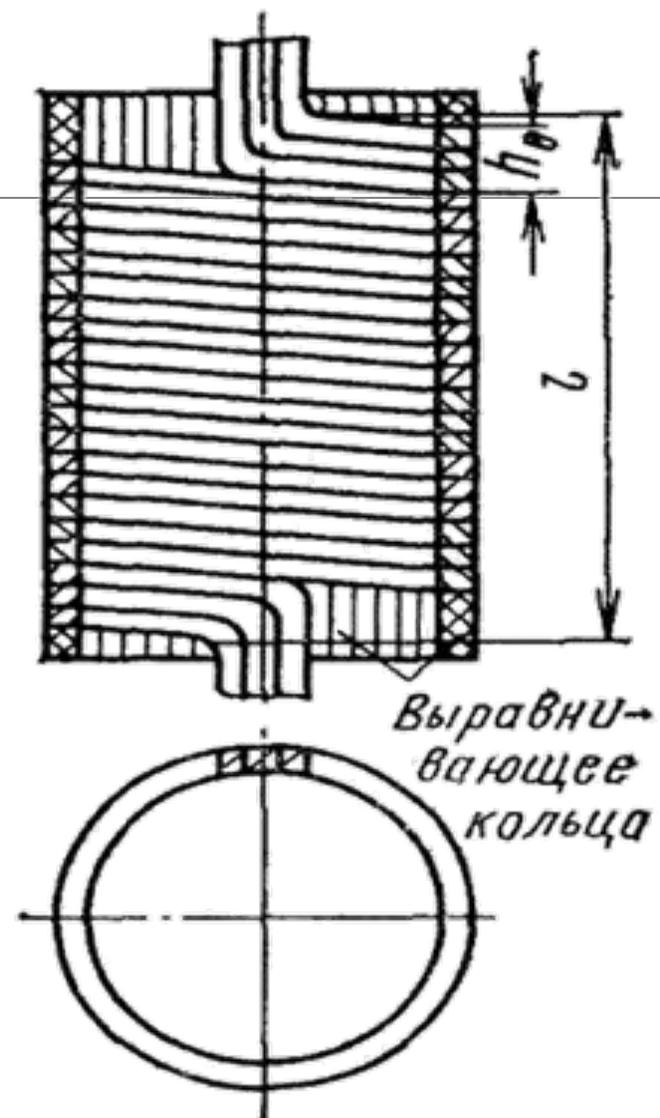
- Простой цилиндрической называется обмотка, сечение витка которой состоит из сечений одного или нескольких параллельных проводов, а витки и все их параллельные провода расположены в один ряд без интервалов на цилиндрической поверхности в ее осевом направлении.
- Обмотка, состоящая из двух или большего числа концентрически расположенных простых цилиндрических обмоток (*слоев*), называется двухслойной или многослойной цилиндрической обмоткой.
- Любая цилиндрическая обмотка может быть намотана из *круглого или прямоугольного провода*, однако **обмотки с одним—тремя слоями для силовых трансформаторов** в большинстве случаев *выполняются из прямоугольного провода*.
- В силу винтовой намотки цилиндрической обмотки ее высота *l (осевой размер)* определяется высотой витка — *h_v* и числом витков на один больше, чем в намотке.
- Для выравнивания торцовых поверхностей обмотки к верхнему и нижнему виткам каждого слоя прикрепляется *опорное разрезное кольцо*, вырезанное из бумажно-бакелитового цилиндра.

Цилиндрическая обмотка

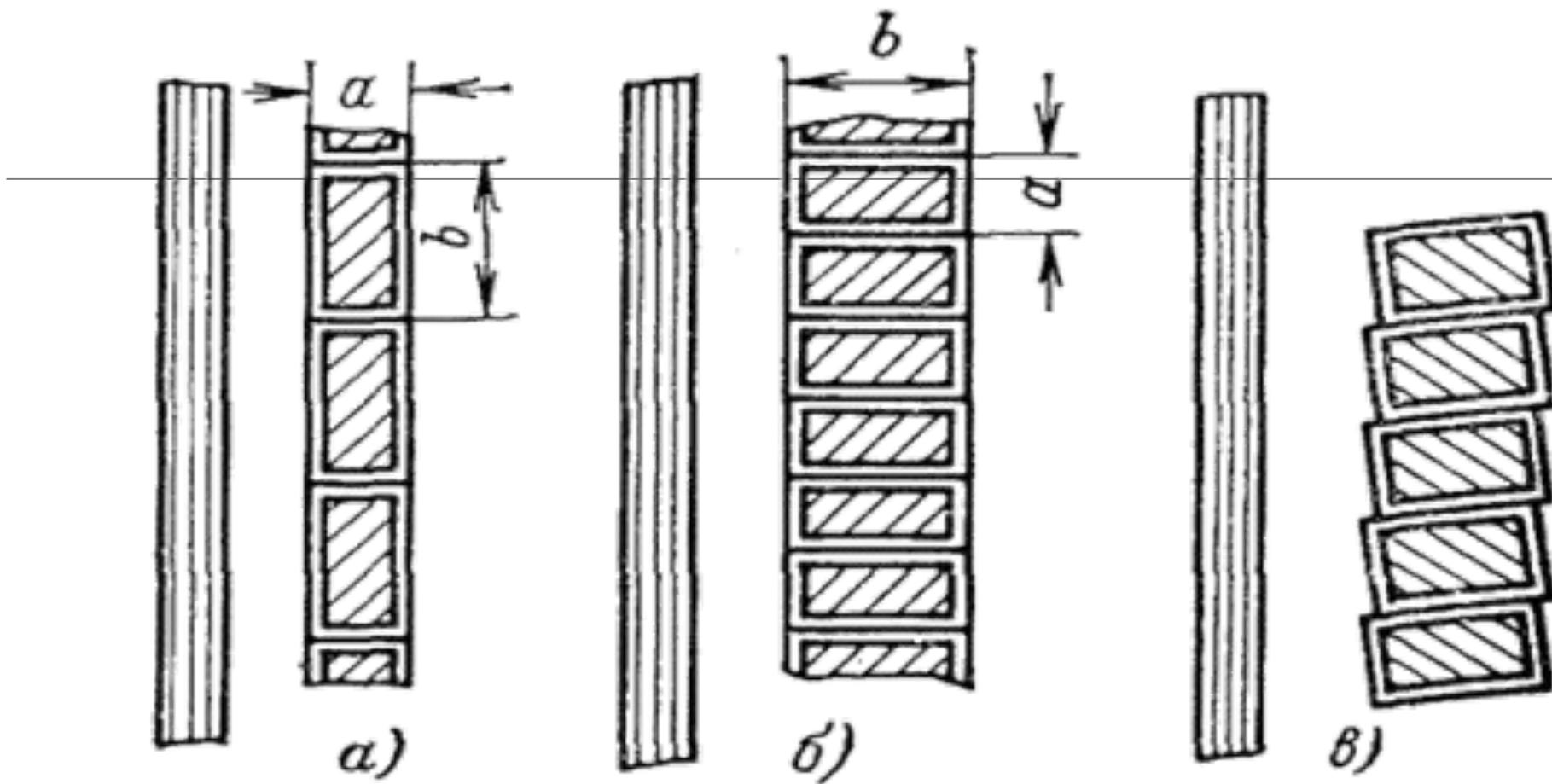


а – однослойная из шести витков; б – двухслойная из 12 витков

Цилиндрическая обмотка из семи витков



Способы намотки цилиндрической обмотки



а - намотка плашмя; б - намотка на ребро; в – неправильная намотка

Характеристика способов намотки

- Намотка провода может производиться плашмя (рис. а) или на ребро (рис. б).
- В первом случае больший размер провода b располагается в осевом направлении, во втором — в радиальном.
- Намотка на ребро несколько труднее намотки плашмя, потому что провод пружинит и стремится повернуться вокруг оси так, как это показано на **рис. в**.
- Кроме того, при намотке на ребро увеличиваются добавочные потери в обмотке, поэтому рекомендуется избегать намотки на ребро, а в случае применения ее употреблять провод с соотношением сторон поперечного сечения $1,3 < b/a < 3$.
- В трехфазных трансформаторах мощностью **25—630 кВА** цилиндрическая обмотка чаще всего наматывается **в два слоя**.
- При мощности **10—16 кВА** обмотка, как правило, выполняется в один слой.
- Сравнительно редко применяется обмотка в три слоя.
- Во всех случаях **для обеспечения нормального охлаждения каждый слой такой обмотки должен хотя бы с одной стороны омываться маслом**.
- Критерием для определения числа поверхностей слоя, омываемых маслом, служит плотность теплового потока с охлаждаемой поверхности слоя q , Вт/м², т. е. потери в обмотке, отнесенные к единице площади поверхности.

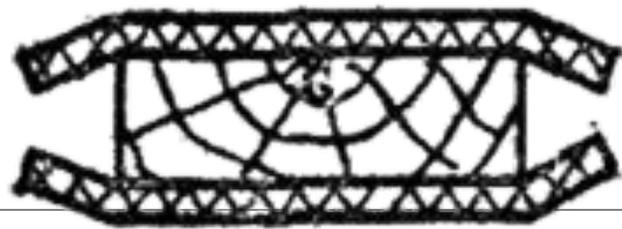
Цилиндрическая обмотка

- При выполнении обмотки в два слоя витки обоих слоев соединяются, как правило, **последовательно**.
- **При параллельном соединении** активные и реактивные сопротивления этих слоев различаются и токи нагрузки в них не будут одинаковыми, что **вызовет увеличение потерь в обмотке**.
- При последовательном соединении слоев **общее число витков обмотки** может быть как *четным*, так и *нечетным*.
- В обоих случаях число витков каждого слоя делается равным половине числа витков всей обмотки.
- **При общем нечетном числе витков** число витков каждого слоя получается **дробным**, кратным половине витка.
- **Полное число витков обмотки** одного стержня всегда *должно быть целым числом*.
- *Изоляция между витками* и *изоляция между слоями обмотки* должна быть рассчитана *по полному напряжению обмотки одного стержня*.

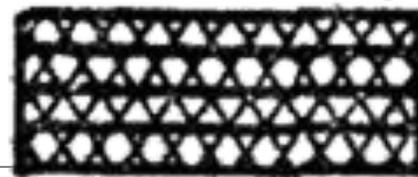
Выполнение изоляции в цилиндрических обмотках

- При рабочих напряжениях **до 1 кВ** изоляция осуществляется масляным каналом шириной **4—8 мм** или *цилиндрической прокладкой* между слоями *из электроизоляционного картона*.
- При рабочих напряжениях обмотки **3 и 6 кВ** необходим **масляный канал с барьером** из двух слоев электроизоляционного картона общей толщиной 2 мм.
- Масляный канал между слоями образуется при помощи **реек**.
- При напряжениях более высоких, чем **6 кВ**, вследствие **усложнения междуслойной изоляции** двухслойная цилиндрическая обмотка в трансформаторах мощностью **25—630 кВА** обычно **не применяется**.
- Для образования в обмотках и между обмотками и изоляционными цилиндрами осевых каналов чаще всего применяются **рейки**, склеенные бакелитовым или другим лаком *из полос электроизоляционного картона* или изготовленные *из дерева твердой породы*, например белого или красного бука.
- При намотке рейки укладываются по образующим цилиндра и плотно прижимаются проводами к цилиндру или ранее намотанной катушке.
- *Толщина рейки определяет ширину (радиальный размер) осевого канала.*

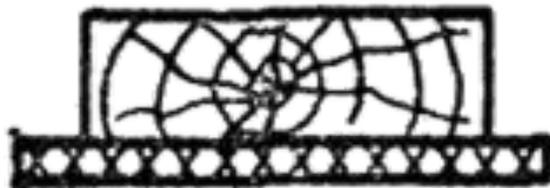
Различные формы поперечного сечения реек



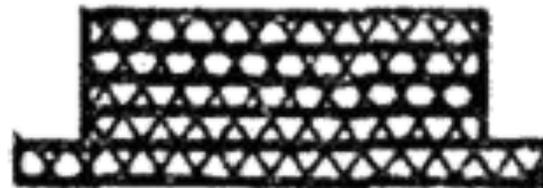
а)



б)



в)



г)

- Рейки формы, показанной **на рис. а и б**, применяются **для образования осевых каналов** в обмотках, *не имеющих радиальных каналов.*
- Рейки формы по **рис. в и г** применяются *в обмотках с радиальными каналами.*
- На выбор числа реек влияет мощность трансформатора.

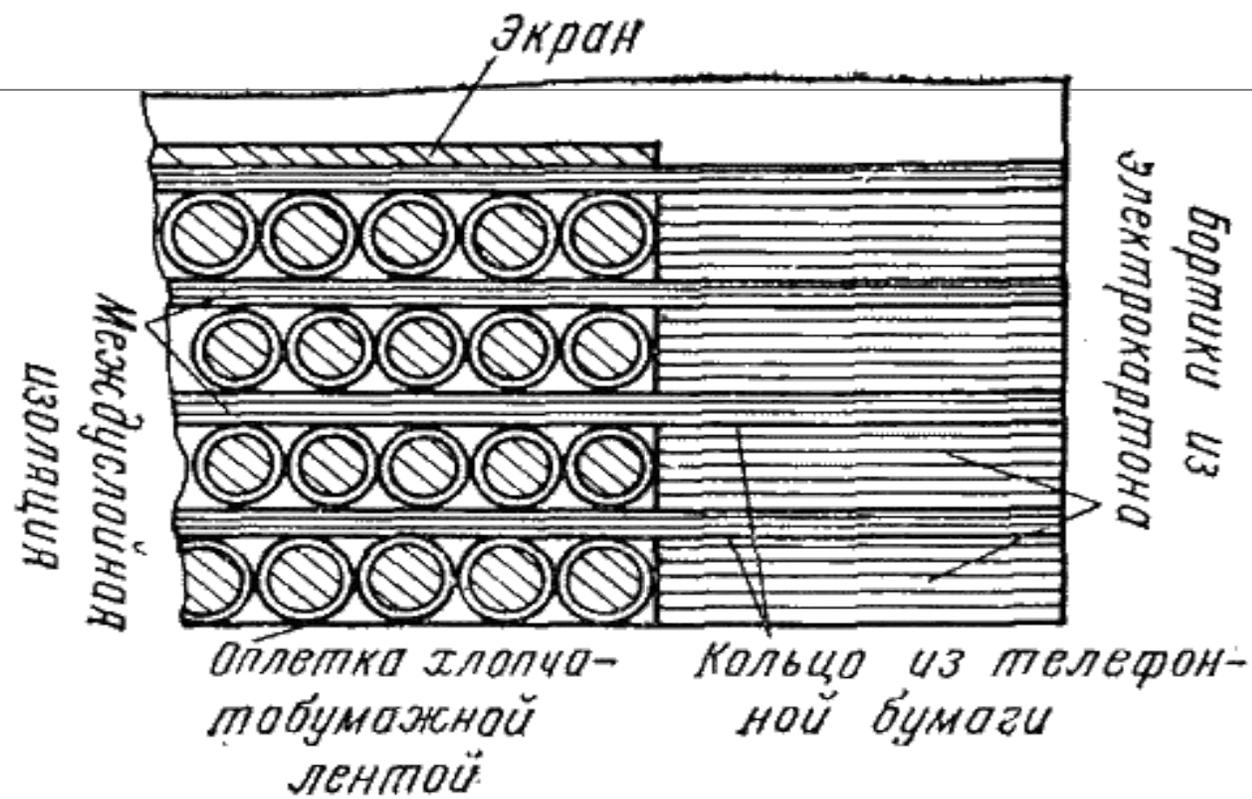
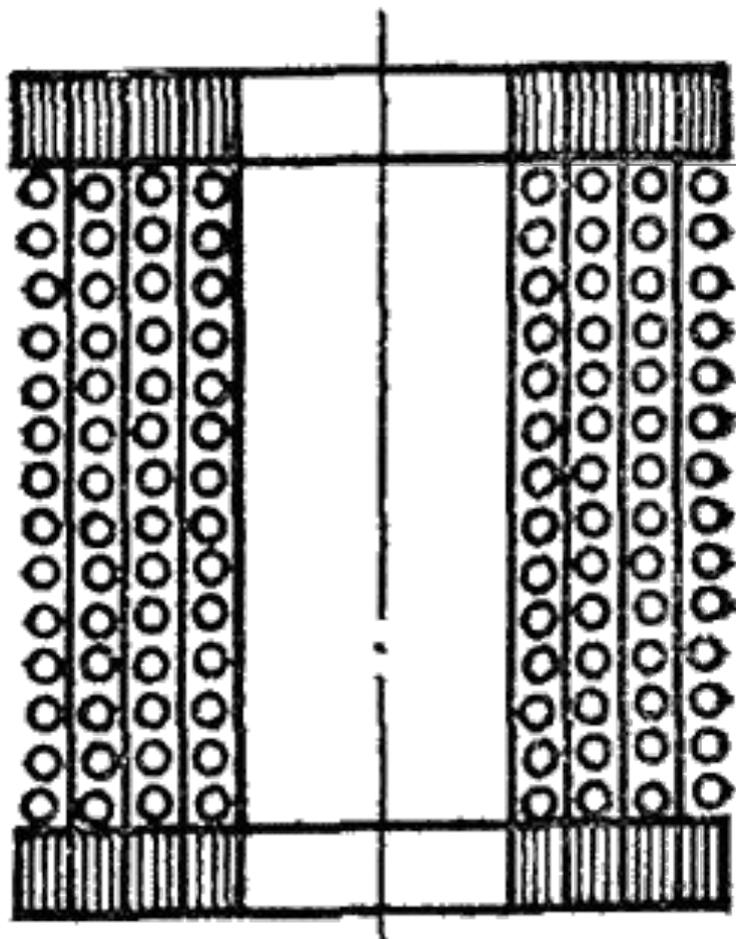
Механическая прочность цилиндрической обмотки

- *Механическая стойкость* цилиндрической обмотки, представляющей в сечении каждого слоя, высокую колонку с относительно малым поперечным размером и относительно неплотной намоткой, при осевых силах, возникающих при коротких замыканиях, **невелика**.
- Вследствие этого применение одно- и двухслойных цилиндрических обмоток ограничивается обычно трансформаторами мощностью **не более 630 кВА**.
- Также по соображениям механической прочности ограничивается и применение большого числа параллельных проводов.
- С увеличением числа параллельных проводов увеличивается высота витка, измеренная в осевом направлении, а вместе с тем и угол наклона провода к плоскости поперечного сечения обмотки, что **при значительных осевых силах**, возникающих при коротких замыканиях, может привести к «*сползанию*» витков.
- Обычно **не рекомендуется** выбирать *число параллельных проводов более четырех—шести при намотке плашмя и шести—восьюми при намотке на ребро*.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ ИЗ КРУГЛОГО ПРОВОДА

- В трансформаторах мощностью **от 25 до 630 кВА** нашли широкое применение многослойные цилиндрические обмотки из круглого медного или алюминиевого провода в качестве **обмоток ВН** при напряжениях от **3 до 35 кВ** и **обмоток НН** при напряжениях **от 3 до 10 кВ**.
- В многослойной цилиндрической обмотке с последовательным соединением слоев вследствие значительного числа витков в слое между соседними витками, лежащими в разных слоях, *могут возникнуть значительные напряжения*.
- В трансформаторах мощностью до 630 кВА при классе напряжения от 3 до 35 кВ *суммарное рабочее напряжение двух слоев* может достигнуть **5000—6000 В**, а **испытательное 10 000—12 000 В**.
- Собственная изоляция провода в этих условиях оказывается недостаточной, и для обеспечения электрической прочности обмотки приходится применять *дополнительную изоляцию между слоями*.
- В качестве такой междуслойной изоляции применяется **кабельная бумага**, положенная в несколько слоев.

Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода

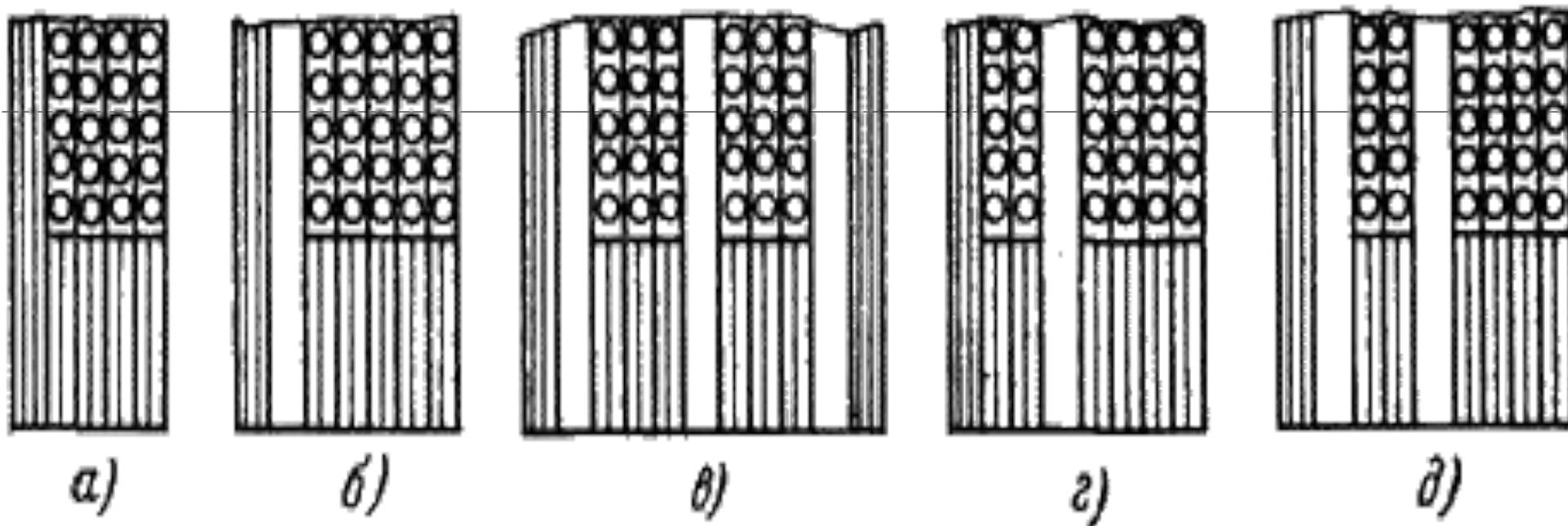


Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода

- Витки, лежащие во внутренних слоях многослойной цилиндрической обмотки, не имеют непосредственного соприкосновения с охлаждающей средой — маслом или воздухом.

- Тепло, выделяющееся в этих витках, должно проходить в радиальном направлении через толщу слоев проводов и междуслойной изоляции, отделяющих эти слои от охлаждающего канала.
- При прохождении теплового потока через толщу обмотки возникает внутренний перепад температуры тем больший, чем больше число слоев обмотки и толщина междуслойной изоляции, и достигающий в отдельных случаях **10—12°C**.
- Для уменьшения этого перепада температуры стараются увеличить общую поверхность охлаждения и уменьшить радиальный размер обмотки.
- Этого можно достигнуть, разделив всю обмотку *на две катушки с осевым каналом между ними*.

Различные варианты выполнения многослойной цилиндрической обмотки



а – обмотка ВН на цилиндре; б – обмотка ВН на рейках; в – обмотка НН из двух катушек на рейках; г – обмотка ВН на цилиндре с каналом; д – обмотка ВН на рейках с каналом

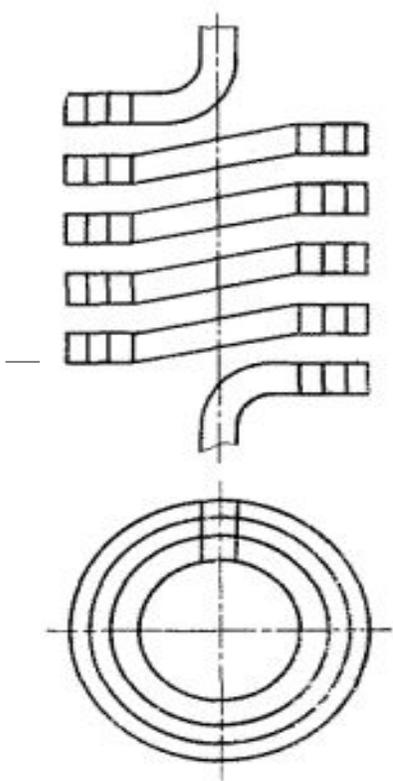
Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода

- В обмотках НН, располагаемых между стержнем и обмоткой ВН, охлаждающий канал делит обмотку на две катушки с одинаковым числом слоев (рис. в).
- В обмотках ВН, у которых внешняя поверхность свободно обтекается маслом и охлаждается лучше, чем внутренние поверхности, **число слоев внутренней катушки составляет до 1/3 общего числа слоев.**
- Расположение обмотки на цилиндре для различных вариантов может быть выполнено по рис. а, б, г, д.
- С учетом перепада температуры допускается плотность теплового потока **не более 800—1000 Вт/м².**
- Многослойная цилиндрическая обмотка может быть намотана **одним** круглым проводом, а также, редко, **двумя параллельными круглыми проводами.**
- Так же как и в других цилиндрических обмотках, высота каждого слоя (**осевой размер обмотки**) определяется числом витков в слое, увеличенным на единицу.

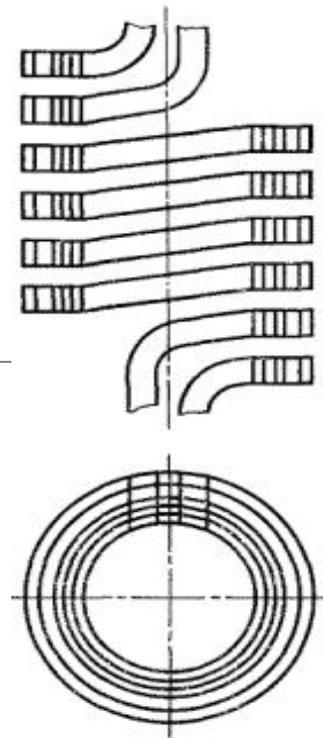
Винтовые обмотки

- **Одноходовой винтовой обмоткой** трансформатора называется обмотка, витки которой следуют один за другим в осевом направлении **по винтовой линии**, а сечение каждого витка образовано сечениями нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, расположенными в один ряд в радиальном направлении обмотки.

- Обычно **витки обмотки разделяются радиальными масляными или воздушными охлаждающими каналами**.
- В некоторых обмотках эти **каналы могут быть сделаны через два витка**.
- Винтовая одноходовая обмотка может быть намотана и без радиальных каналов с плотным прилеганием витка к витку.
- Обмотка, состоящая из двух (или более) одноходовых обмоток, взаимно расположенных подобно ходам резьбы двухходового (многоходового) винта, называется **двухходовой** (многоходовой) винтовой обмоткой.
- Сечение витка при этом образуется общим поперечным сечением проводов всех ходов.
- Двухходовая обмотка также может быть выполнена с радиальными каналами между всеми витками и внутри витков между образующими их ходами, или с каналами только между витками и без каналов внутри витков, или совсем без радиальных каналов с плотным прилеганием всех ходов.



Одноходовая винтовая обмотка



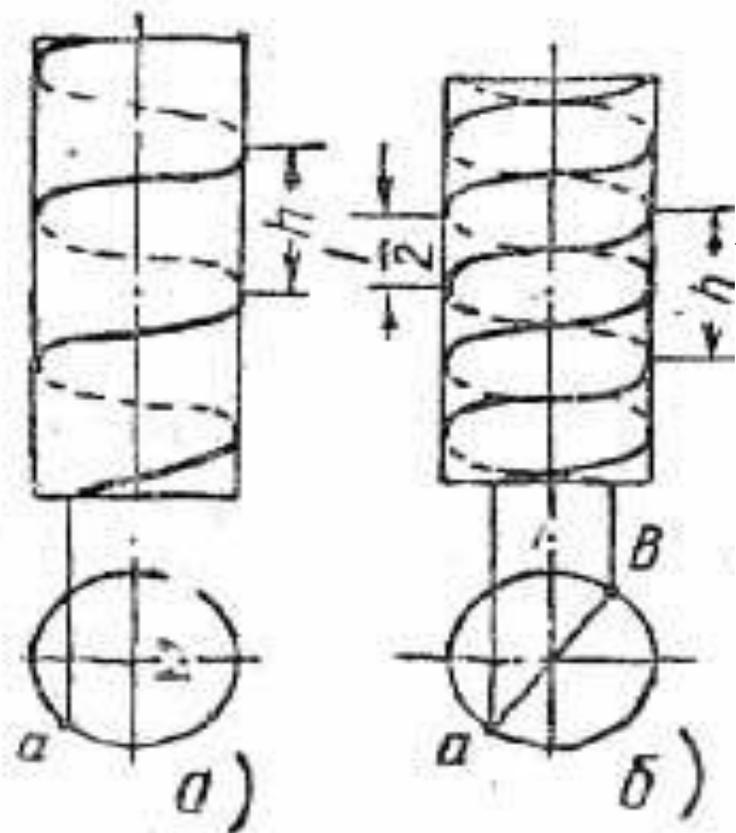
Двухходовая винтовая обмотка

Одноходовая винтовая обмотка

Обмотка, витки которой следуют один за другим в осевом направлении по винтовой линии, а сечение каждого витка образовано сечениями нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, расположенными в один ряд в радиальном направлении обмотки

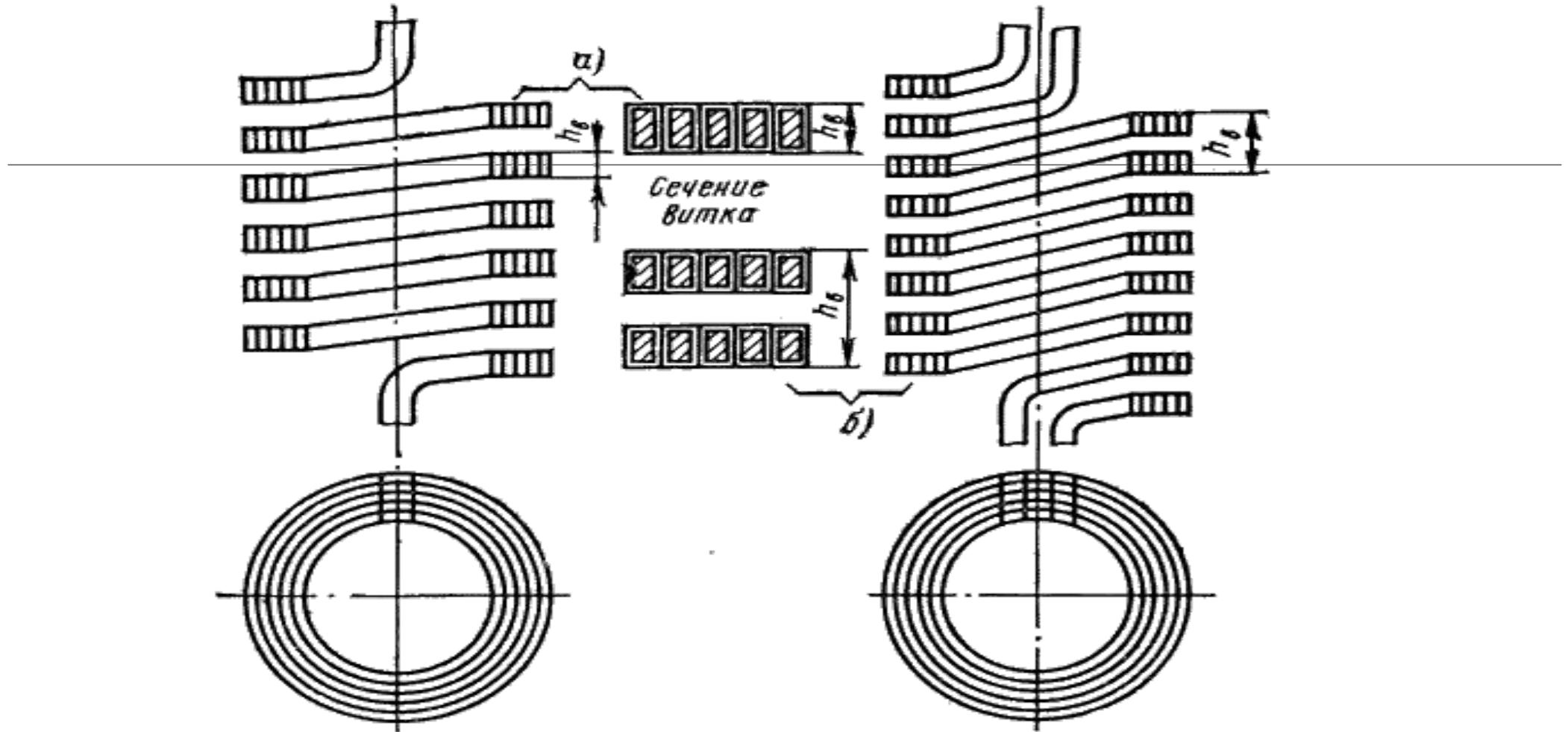
Двухходовая (многоходовая) винтовая обмотка

Обмотка, состоящая из двух или более одноходовых обмоток, взаимно расположенных подобно ходам резьбы двухходового (многоходового) винта.



Фиг. 87. Одно- и двух-
ходовая винтовые линии.

Винтовая обмотка

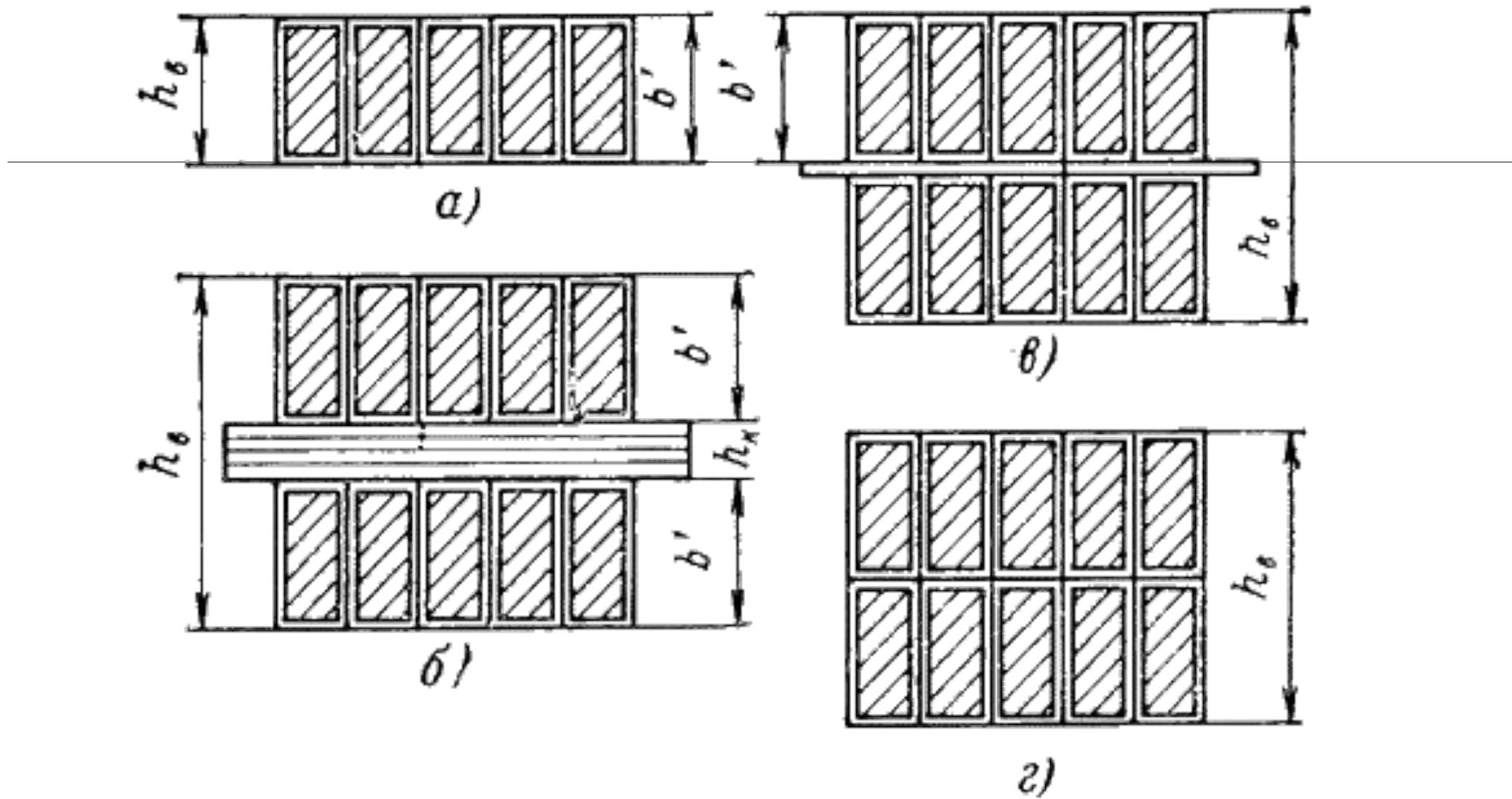


а – одноходовая из шести витков; б – двухходовая из четырех витков

Винтовая обмотка

- Винтовая обмотка выполняется только из прямоугольного провода.
 - При этом все параллельные провода этой обмотки обязательно должны иметь равные не только площади, но и размеры поперечного сечения.
-
- При несоблюдении этого правила становится невозможным уравнивание сопротивлений параллельных проводов путем их перекладки в процессе намотки обмотки.
 - Обе группы проводов у начала и конца обмотки **соединяются параллельно**.
 - В большинстве случаев **в двухходовых обмотках радиальные каналы выполняются как *между витками*, так и *внутри витка между группами проводов*** (рис. б).
 - Иногда для экономии места по высоте обмотки радиальные каналы делаются только между витками и обе группы проводов в каждом витке наматываются вплотную **с прокладкой** между группами толщиной 0,5— 1,0 мм (рис. в).
 - Прокладка обеспечивает механическую устойчивость обмотки.
 - Двух- и четырехходовая винтовая обмотка может быть также выполнена **без радиальных каналов и без прокладок в витках и между витками** (рис. г).

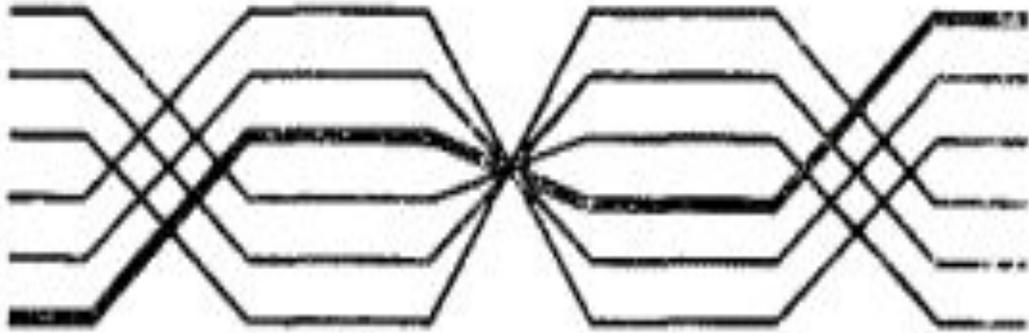
Сечение витка винтовой обмотки



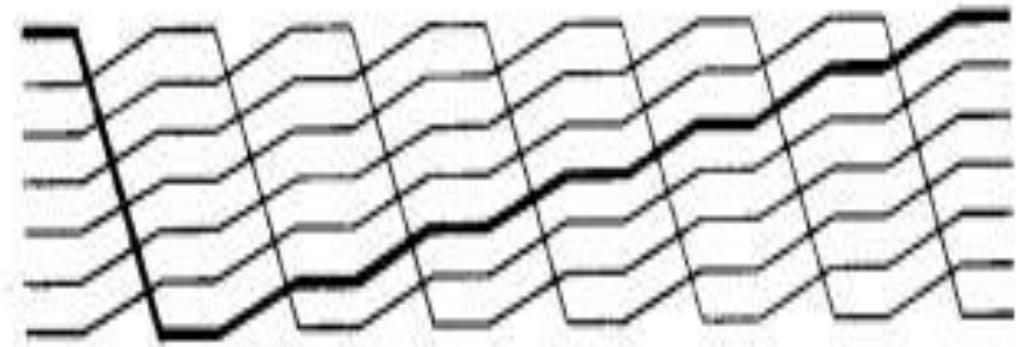
Транспозиция проводов в винтовых обмотках

- В винтовой обмотке параллельные провода наматываются на цилиндрических поверхностях *с разными диаметрами*.
- Вследствие этого *активные сопротивления параллельных проводов получаются неравными*.
- Различное положение проводов в поле рассеяния обмотки приводит к неравенству реактивных, а следовательно, и полных сопротивлений параллельных проводов.
- Для выравнивания полных сопротивлений проводов во избежание неравномерного распределения тока в винтовой обмотке обязательно должна производиться **транспозиция (перекладка)** проводов.
- В одноходовой обмотке обычно применяют комбинацию двух видов транспозиции:
 - *групповую*, когда все параллельные провода делятся на две или большее число групп и изменяется взаимное расположение этих групп без изменения расположения проводов в группе;
 - *общую*, при которой изменяется взаимное расположение всех проводов.
- При применении транспозиции этих видов обмотка делится по длине *на четыре равных участка, содержащих по 1/4 всех витков обмотки*.
- На границах этих участков производится три транспозиции — *две групповые* на 1/4 и 3/4 общего числа витков, считая от начала обмотки, и *одна общая* на 2/4 общего числа витков.

Виды транспозиции



Групповая
транспозиция Общая
транспозиция Групповая
транспозиция

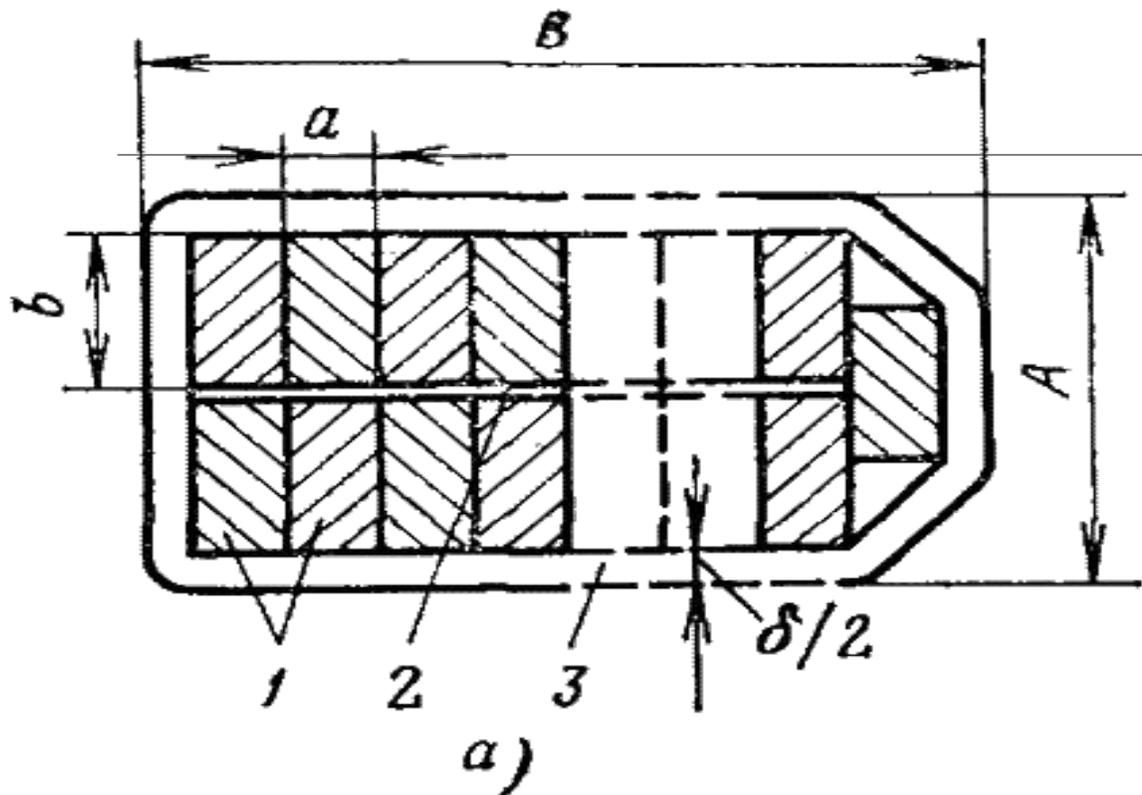


**Равномерно распределенная транспозиция
проводов обмотки трансформатора**

Винтовая обмотка

- Наличие масляных каналов между соседними витками обеспечивает высокую электрическую прочность винтовой обмотки, и она находит широкое применение в качестве обмотки НН в трансформаторах с напряжением **НН от 230 В до 35 кВ** включительно.
- **На стороне ВН** винтовая обмотка *не нашла применения* ввиду неудобства выполнения ответвлений для регулирования напряжения.
- В производстве винтовая обмотка значительно *дороже* многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода.
- Винтовая обмотка используется также в качестве *обмотки НН в сухих трансформаторах* с естественным воздушным охлаждением при мощностях **от 250 до 1600 кВА** при определенных размерах радиальных и осевых воздушных каналов.

Транспонированный провод

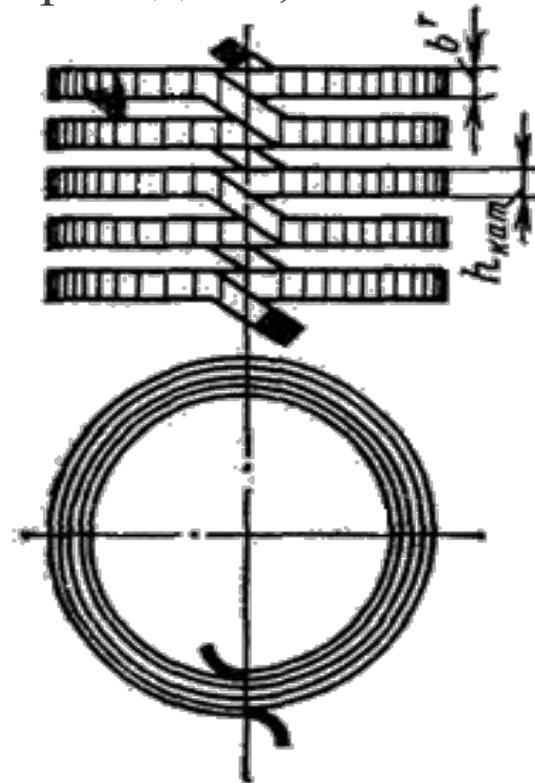


а - поперечное сечение провода:
1- параллельные проводники с эмалевой изоляцией; 2 - прокладка из кабельной бумаги; 3 - общая изоляция из кабельной бумаги)

Применение транспонированных проводов позволяет уменьшить объем и массу металла обмоток, упростить процесс намотки обмоток и уменьшить добавочные потери в обмотках.

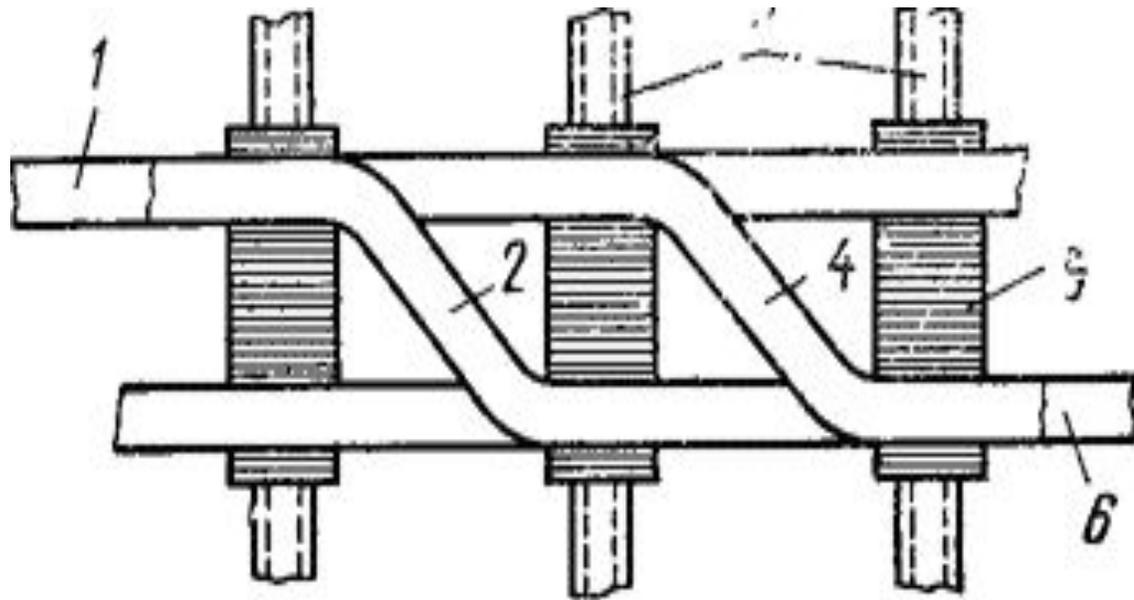
Катушечные обмотки

- Обмотка, состоящая из ряда последовательно соединенных катушек, намотанных в виде плоских спиралей из одного или более проводов прямоугольного сечения и расположенных в осевом направлении обмотки, с радиальными каналами между всеми или частью катушек называется катушечной обмоткой.
- Если катушечная обмотка наматывается непрерывным проводом или несколькими непрерывными параллельными проводами, она называется непрерывной катушечной обмоткой.



Транспозиция проводников в трансформаторных обмотках

- В непрерывных катушечных обмотках, состоящих из нескольких параллельных проводов, более удаленные от оси витки провода имеют большую длину, а менее удаленные — меньшую.
- Чтобы уравнивать длины, а следовательно, сопротивления проводов при переходах из катушки в катушку, их меняют местами — делают транспозицию.



**1 и 6 — верхняя и нижняя катушки, 2 и 4 — транспонируемые провода,
3 — рейки, 5 — дистанционные прокладки**

- Механически непрерывная катушечная обмотка является одной из самых прочных обмоток, применяемых в трансформаторах.
- С увеличением мощности трансформатора и ростом осевой составляющей механических сил при коротком замыкании растут также радиальный размер катушек обмотки и ее механическая стойкость.
- Катушечная обмотка может применяться на очень большом диапазоне мощности трансформаторов **от 160 до 1000000 кВА** и в широком диапазоне напряжений от **2-3 до 500 кВ** и более.
- Плотность теплового потока на поверхности катушечных обмоток обычно допускают не более 1200—1400 Вт/м².
- В производстве непрерывная катушечная обмотка при равном числе витков и сечении витка несколько **сложнее и дороже**, чем одно- и двухслойная цилиндрическая из прямоугольного провода или многослойная цилиндрическая из круглого или прямоугольного провода.
- Поэтому в трансформаторах с **мощностью на один стержень до 250 кВА** предпочтительнее применять цилиндрические обмотки из круглого провода.

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК

На выбор конструкции обмоток влияют:

- ток нагрузки одного стержня - I_c ;
- мощность трансформатора - S ;
- номинальное напряжение - U_n ;
- поперечное сечение витка обмотки - Π .