

# **Электрические трансформаторы**

## **РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

## ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТ

- В задании на проект двухобмоточного трансформатора должны быть указаны следующие данные:
  - полная мощность трансформатора -  $S$ , кВА;
  - число фаз -  $m$ ;
  - частота –  $f$ , Гц,;
  - номинальные линейные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений  $U_2$  и  $U_1$ , В; способ регулирования напряжения - переключение без возбуждения (ПБВ) или регулирование под нагрузкой (РПН), число ступеней, напряжение ступени и пределы регулирования напряжения;
  - схема и группа соединения обмоток;
  - способ охлаждения трансформатора;
  - режим нагрузки – продолжительный, кратковременный или другой. При кратковременном или другом режиме должны быть указаны его параметры – продолжительность работы и интервалов и отдаваемая трансформатором мощность (или ток);
  - характер установки - внутренняя или наружная, т.е. внутри помещения или на открытом РУ.

## Исходные данные для проектирования

- Кроме этих данных в задании обычно указываются некоторые параметры трансформатора:
  - напряжение короткого замыкания -  $U_k$ , %;
  - потери короткого замыкания -  $P_k$ , кВт;
  - потери холостого хода -  $P_x$ , кВт;
  - ток холостого хода -  $i_x$ , %.
- В задании могут быть указаны некоторые дополнительные условия:
  - *марка стали;*
  - *выполнение обмоток из медного или алюминиевого провода* и др.
- Если в двухобмоточном трансформаторе предусматривается расщепление обмоток на две части, то должны быть указаны напряжения двух частей обмотки НН.
- Номинальная мощность каждой из этих частей обычно принимается равной половине номинальной мощности трансформатора.

## Исходные данные для трехобмоточного трансформатора

- Для трехобмоточного трансформатора указывают:
  - *мощности каждой из трех обмоток, если они различны (номинальной считается наибольшая из мощностей трех обмоток);*
  - *номинальные напряжения трех обмоток;*
  - *соответственно схемы и группы соединения обмоток;*
  - *три значения напряжения короткого замыкания, отнесенного к номинальной мощности трансформатора;*
  - *три значения потерь короткого замыкания для трех пар обмоток ВН и СН, ВН и НН, СН и НН.*

## Другие показатели трансформаторов

- При проектировании трансформатора в соответствии с заданием должно быть также обеспечено:
  - его соответствие современным требованиям к электрической и механической прочности и нагревостойкости обмоток и других частей;
  - к экономичности его работы в эксплуатации.
- Экономичность трансформатора в эксплуатации определяется сопоставлением стоимости трансформатора, отнесенной к определенному промежутку времени, с эксплуатационными затратами за этот промежуток и зависит в значительной мере от таких параметров, как *потери холостого хода и короткого замыкания*.
- Для силового трансформатора уровни потерь холостого хода и короткого замыкания обычно устанавливаются при проектировании новых серий и разработке новых стандартов.
- При индивидуальном проектировании силового трансформатора общего или специального назначения параметры холостого хода и короткого замыкания, как правило, задаются соответствующим ГОСТ.
- Получение определенных параметров достигается *рациональным выбором основных размеров* трансформатора, а также подбором соответствующих удельных нагрузок активных материалов:
  - индукции в магнитной системе;
  - плотности тока в обмотках.

# Последовательность расчета трансформатора

## 1. **Определение основных электрических величин:**

- линейных и фазных токов и напряжений обмоток ВН и НН;
- испытательных напряжений обмоток;
- активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания.

## 2. **Расчет основных размеров трансформатора:**

- выбор схемы, конструкции и технологии изготовления магнитной системы;
- выбор марки и толщины листов стали и типа изоляции пласти, индукции в магнитной системе;
- выбор материала обмоток;
- предварительный выбор конструкции обмоток;
- выбор конструкции и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток;
- предварительный расчет трансформатора и выбор соотношения основных размеров  $\beta$  с учетом заданных значений  $U_k$ ,  $P_k$  и  $P_x$ ;
- определение диаметра стержня и высоты обмотки, предварительный расчет магнитной системы.

## Последовательность расчета трансформатора

### 3. Расчет обмоток НН и ВН:

- выбор типа обмоток НН и ВН;
- расчет обмотки НН;
- расчет обмотки ВН.

### 4. Определение параметров короткого замыкания:

- потерь короткого замыкания - основных и добавочных в обмотках, добавочных в элементах конструкции;
- напряжения короткого замыкания;
- механических сил в обмотках.

### 5. **Окончательный расчет магнитной системы. Определение параметров холостого хода:**

- размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма;
- массы стержней и ярм и массы стали;
- потерь холостого хода;
- тока холостого хода.

# Последовательность расчета трансформатора

## 6. Тепловой расчет и расчет системы охлаждения:

- поверочный тепловой расчет обмоток;
- расчет системы охлаждения (бака, радиаторов, охладителей).
- определение габаритных размеров трансформатора;
- определение превышений температуры обмоток и масла над воздухом;
- определение массы масла и основных размеров расширителя.

## 7. Экономический расчет:

- расчет расхода активных и конструктивных материалов;
- ориентировочный расчет себестоимости и цены трансформатора;
- определение приведенных годовых затрат и оценка экономичности рассчитанного трансформатора.

# РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ТРАНСФОРМАТОРОВ

- Расчет трансформатора начинается с определения основных электрических величин:
  - *мощности на одну фазу и стержень;*
  - *номинальных токов на стороне ВН и НН;*
  - *фазных токов и напряжений.*

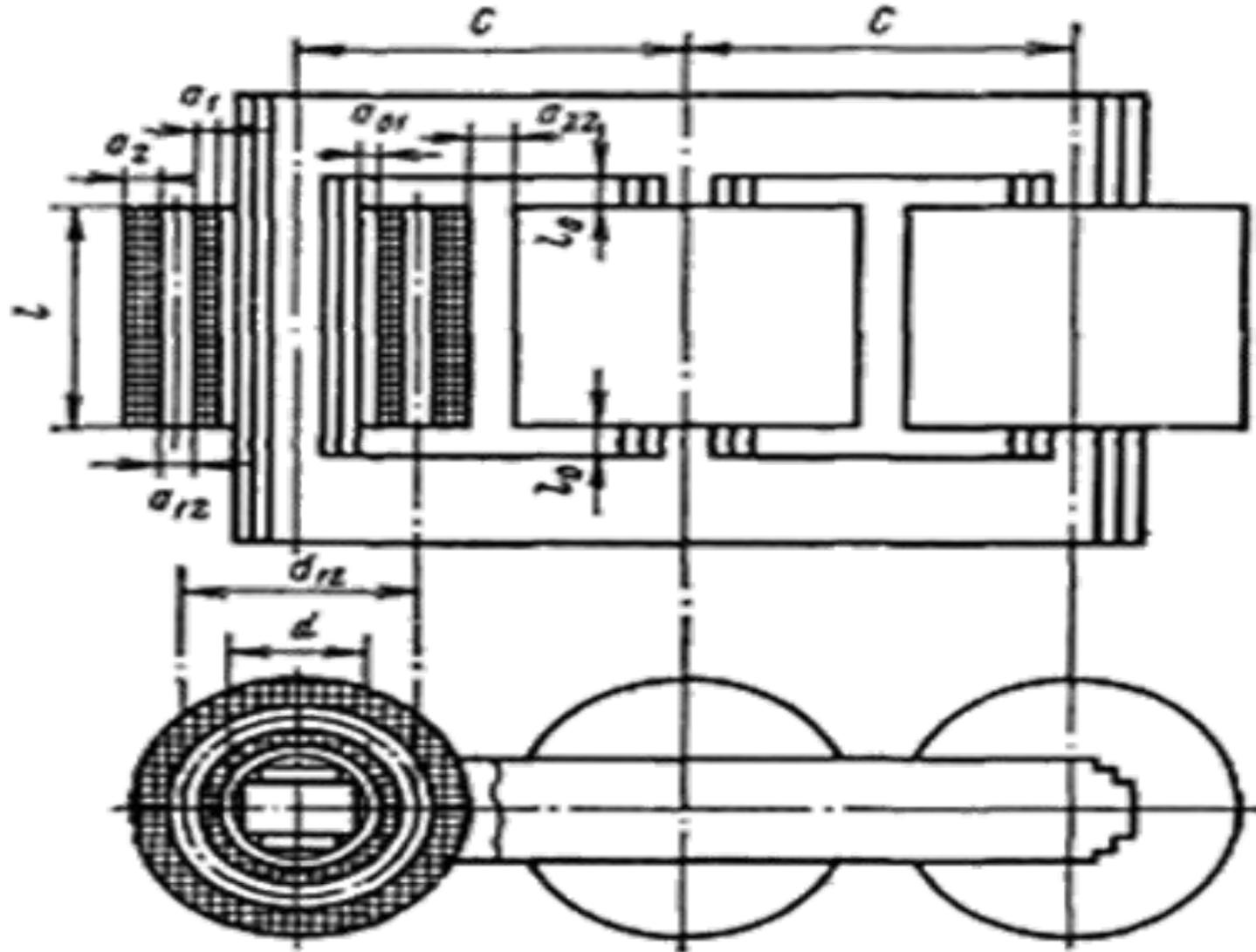
## Определение испытательных напряжений

- Для определения изоляционных промежутков между обмотками и другими токоведущими частями и заземленными деталями трансформатора существенное значение имеют испытательные напряжения, при которых проверяется электрическая прочность изоляции трансформатора.
- Эти испытательные напряжения определяются для каждой обмотки трансформатора по ее классу напряжения.

<b>Класс напряжения, кВ</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>35</b>	<b>110</b>	<b>150</b>	<b>220</b>	<b>330</b>	<b>500</b>
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	3,6	7,2	12,0	17,5	24	40,5	126	172	252	363	525
Испытательное напряжение $U_{исп}$ , кВ	18	25	35	45	55	85	200	230	325	460	630

## ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

- Выбор основных размеров магнитной системы вместе с основными размерами обмоток определяет главные размеры активной части и всего трансформатора.



## ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

- Три основных размера трансформатора:

1. **Диаметр  $d$  окружности**, в которую вписано ступенчатое сечение стержня;
2. **Осевой размер  $l$**  (высота) его обмоток.

Обычно обе обмотки трансформатора имеют одинаковую высоту.

3. Средний диаметр витка двух обмоток, или **диаметр осевого канала между обмотками  $d_{12}$** , связывающий диаметр стержня с радиальными размерами обмоток  $a_1$  и  $a_2$  и осевого канала между ними  $a_{12}$ .

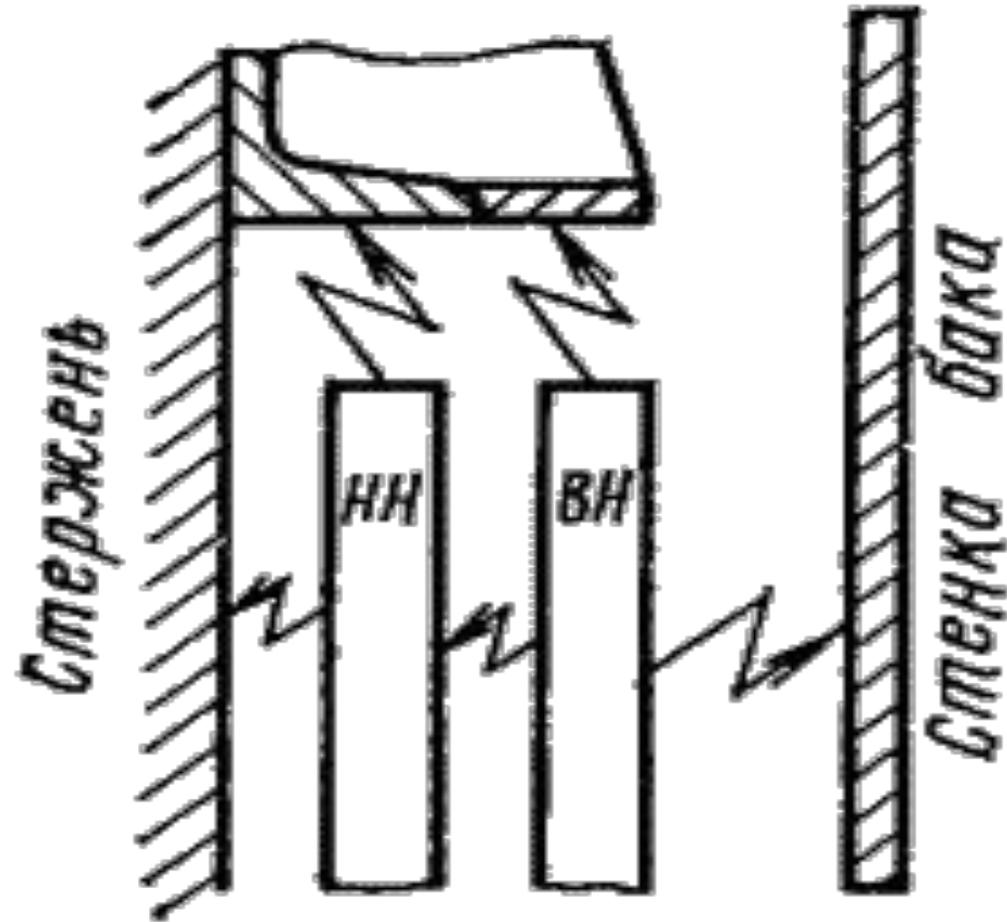
- Если эти три размера выбраны или известны, то остальные размеры, определяющие форму и объем магнитной системы и обмоток:

□ *высота стержня  $l_c$* ;

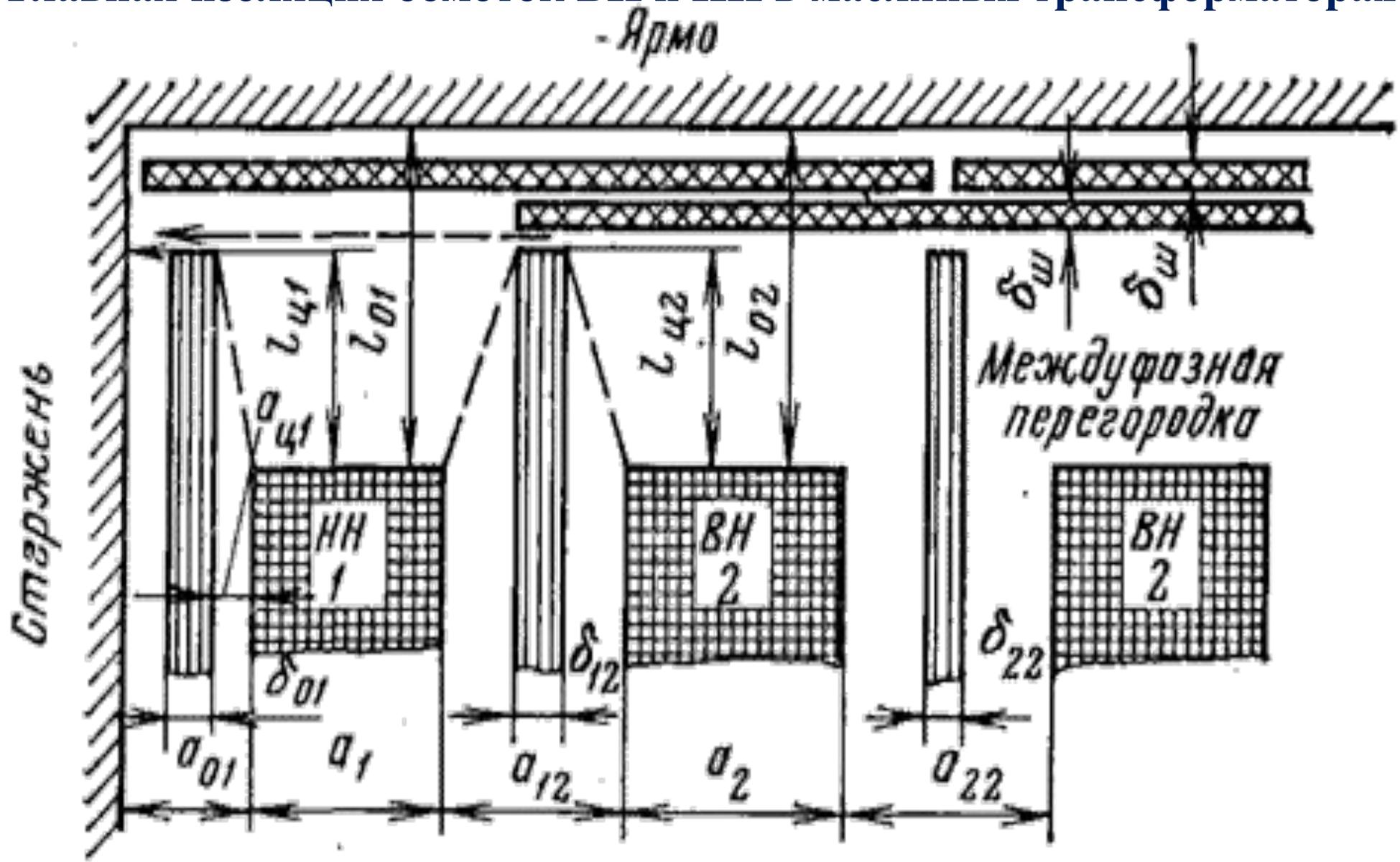
□ *расстояние между осями соседних стержней  $S$  и т.д.*

могут быть найдены, если известны допустимые изоляционные расстояния от обмоток ВН до заземленных частей и до других обмоток ( $a_{12}, a_{22}, l_o$ ).

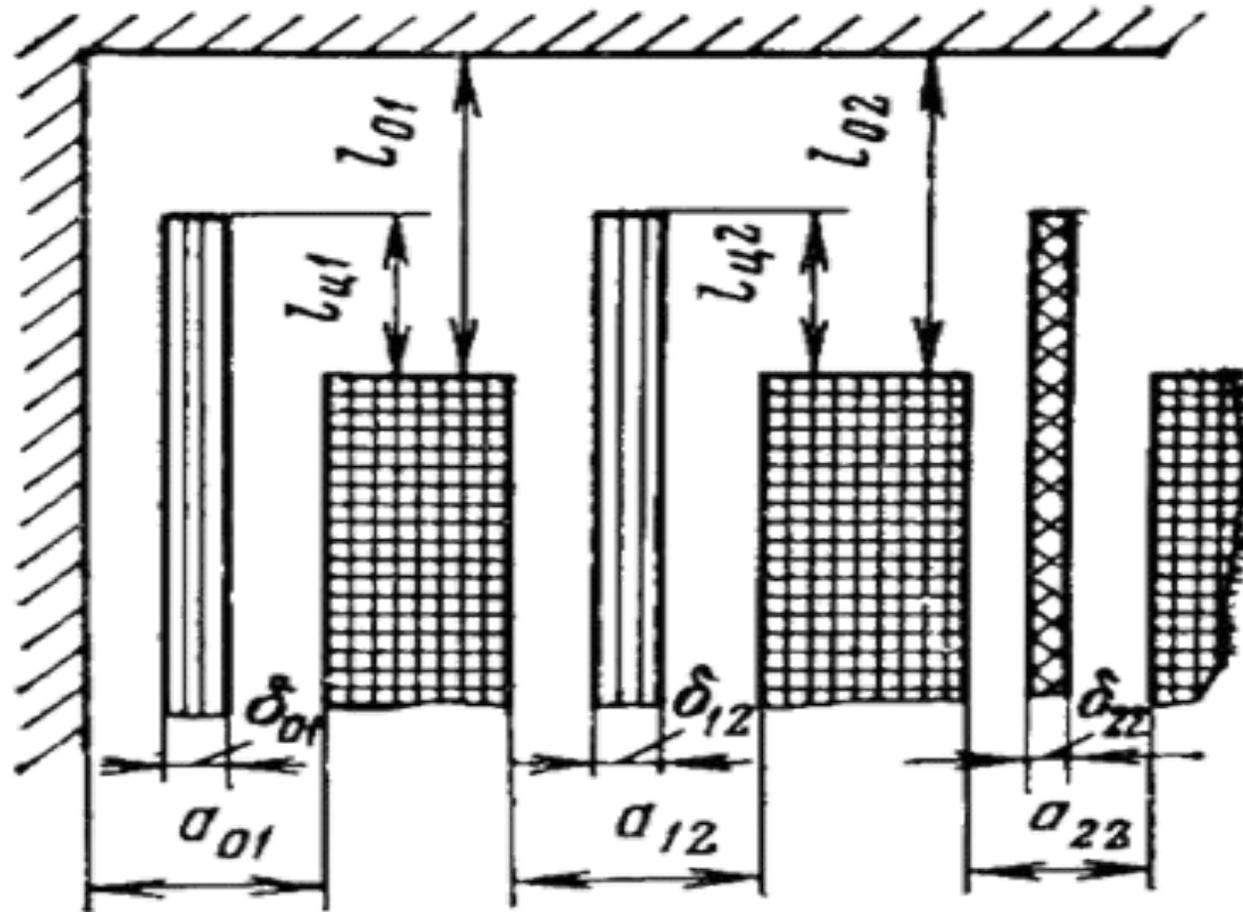
# Основные изоляционные промежутки главной изоляции в концентрических обмотках



# Главная изоляция обмоток ВН и НН в масляных трансформаторах



# Главная изоляция в сухих трансформаторах



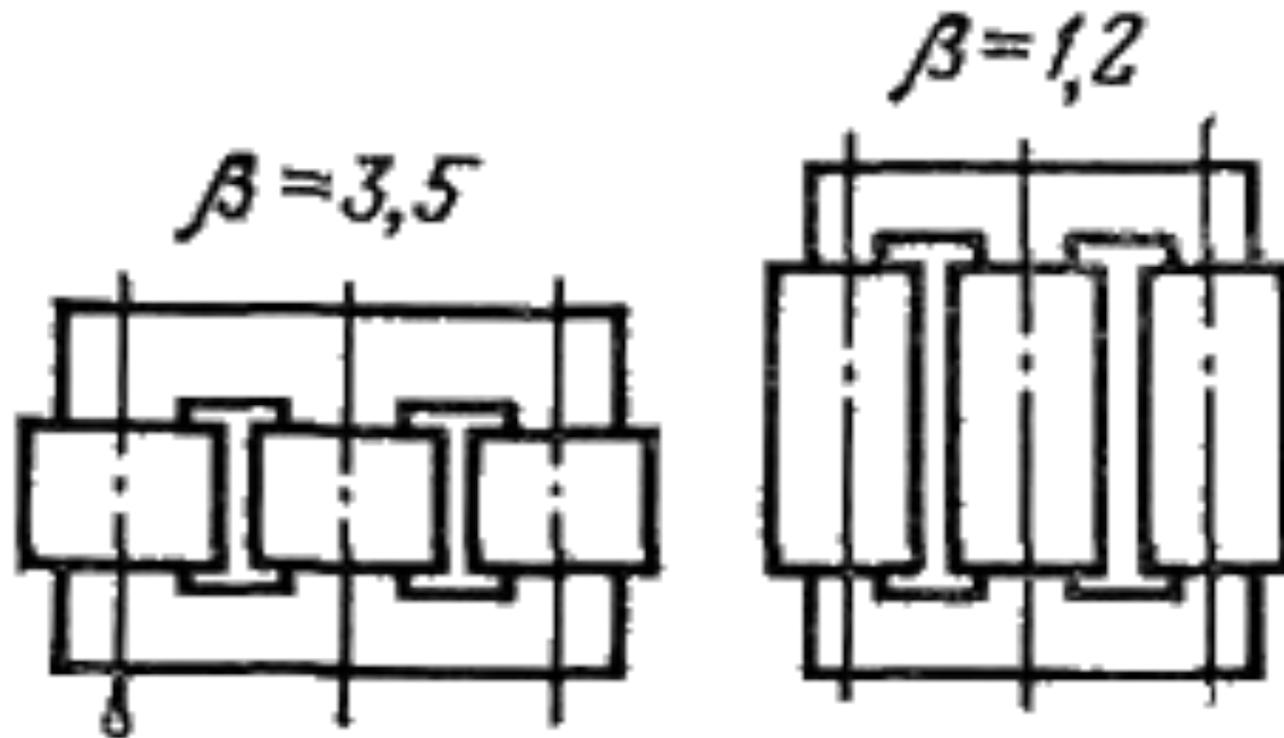
## Коэффициент $\beta$

- Два основных размера, относящихся к обмоткам  $d_{12}$  и  $l_c$ , могут быть связаны отношением средней длины окружности канала между обмотками  $\pi d_{12}$  к высоте обмотки  $l$ :

$$\beta = \pi d_{12} / l$$

- Приблизительно произведение  $\pi d_{12}$  можно приравнять к средней длине витка двух обмоток  $\pi d_{12} \approx l_{\text{в}}$  или  $l_{\text{в}} / l = \beta$ .
- Величина  $\beta$  определяет соотношение между **диаметром** и **высотой обмотки**.
- Значение  $\beta$  может варьироваться в широких пределах и практически изменяется в масляных и сухих трансформаторах существующих серий в пределах **от 1 до 3,5**.
- При этом меньшим значениям  $\beta$  соответствуют трансформаторы относительно узкие и высокие, большим— широкие и низкие.

## Соотношение размеров двух трансформаторов с разными значениями $\beta$



Трансформаторы одинаковой мощности, одного класса напряжения, рассчитанных при одинаковых исходных данных ( $B_c, k_c$ ), с одинаковыми параметрами короткого замыкания ( $P_k$  и  $U_k$ ).

## Влияние $\beta$ на параметры трансформатора

- Различным значениям  $\beta$  соответствуют и разные соотношения между массами активных материалов - стали магнитной системы и металла обмоток.
- Меньшим значениям  $\beta$  соответствует меньшая масса стали и большая масса металла обмоток.
- С увеличением  $\beta$  масса стали увеличивается, масса металла обмоток уменьшается.
- Таким образом, выбор  $\beta$  существенно влияет не только на соотношение размеров трансформатора, но и на соотношение масс активных и других материалов, а следовательно, и на стоимость трансформатора.
- Вместе с этим изменение  $\beta$  сказывается и на технических параметрах трансформатора:

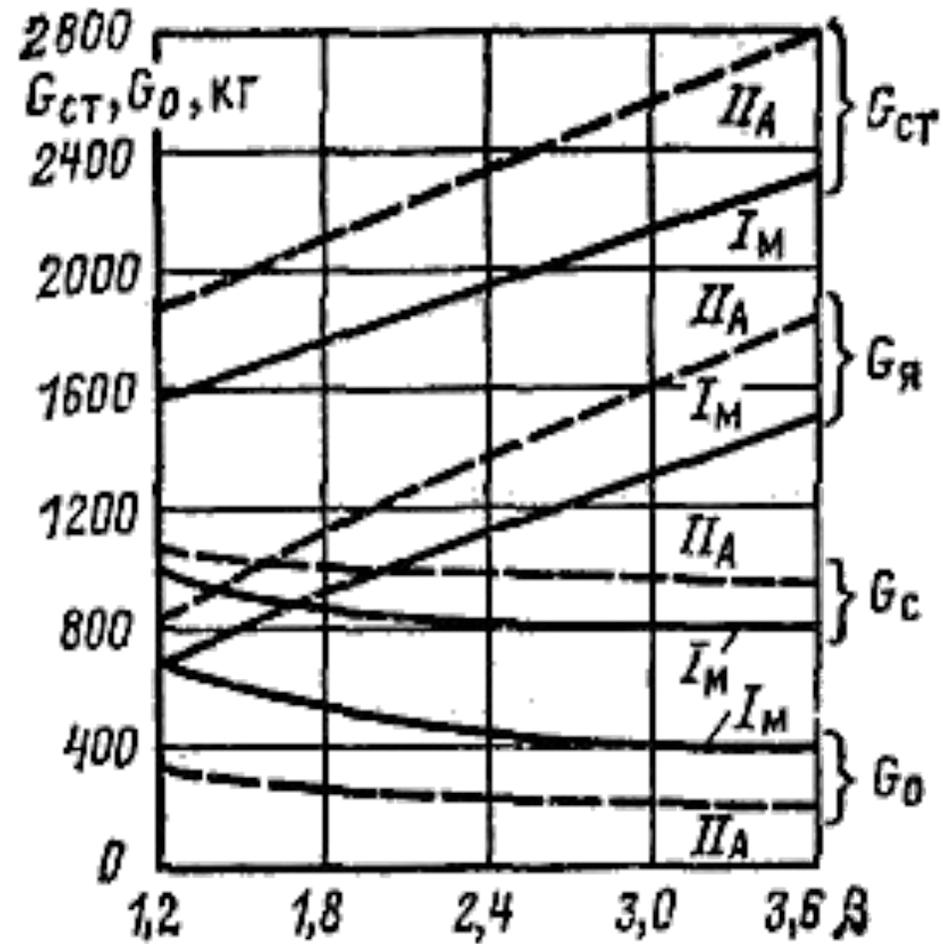
*□ потерях и токе холостого хода;*

*□ механической прочности и нагревостойкости обмоток;*

*□ габаритных размерах.*

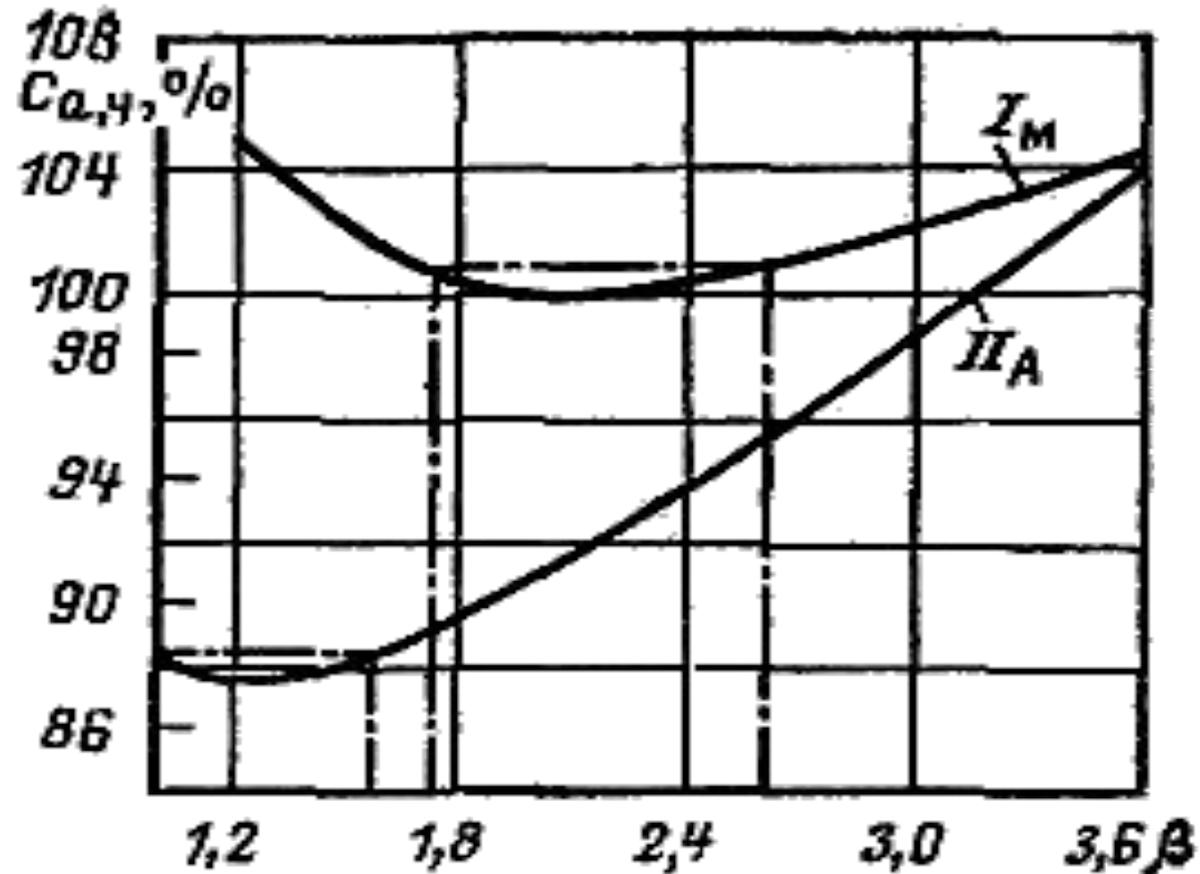
- **Оптимальным значением  $\beta$**  при его варьировании в достаточно широких пределах будет то, при котором *стоимость трансформатора окажется минимальной.*

## Влияние $\beta$ на параметры трансформатора



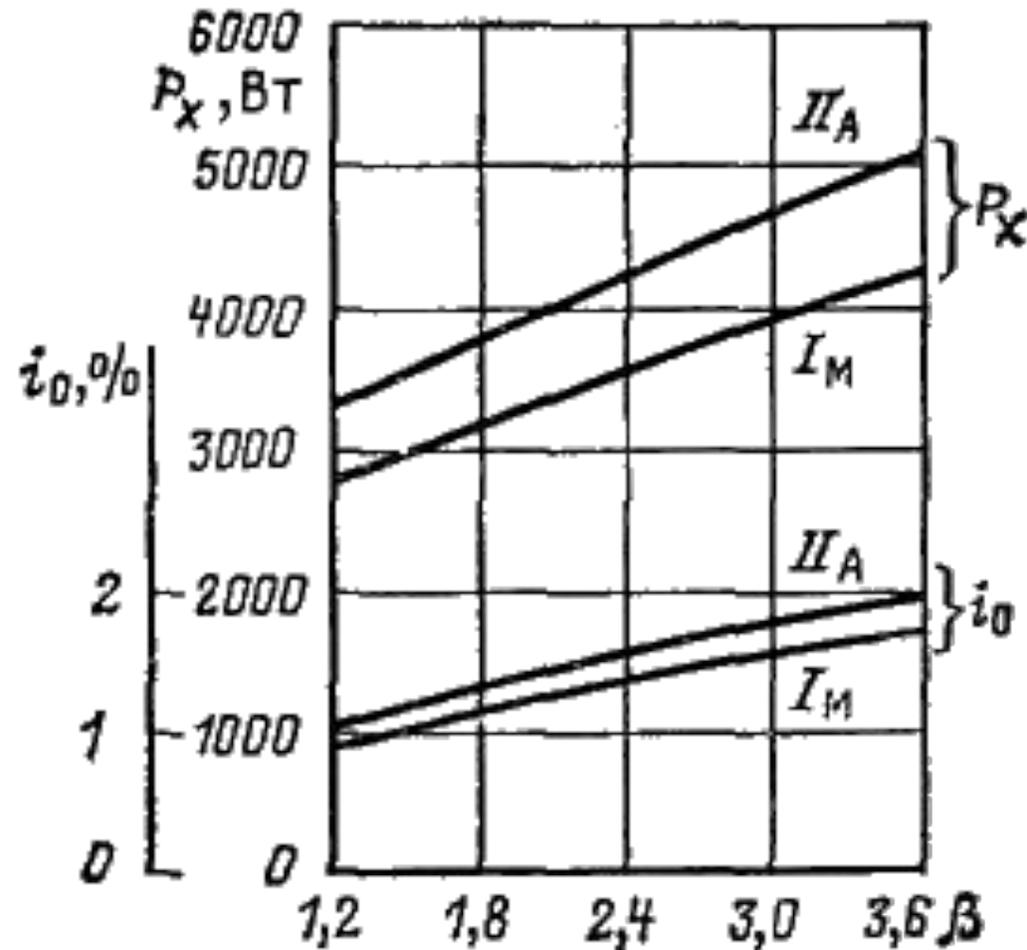
Изменение массы стали стержней  $G_c$ , ярм  $G_я$ , магнитной системы  $G_{ст}$  и металла обмоток  $G_o$  с изменением  $\beta$  для трансформатора типа ТМ-1600/35 с медными ( $I_M$ ) и алюминиевыми обмотками ( $I_A$ )

## Влияние $\beta$ на параметры трансформатора



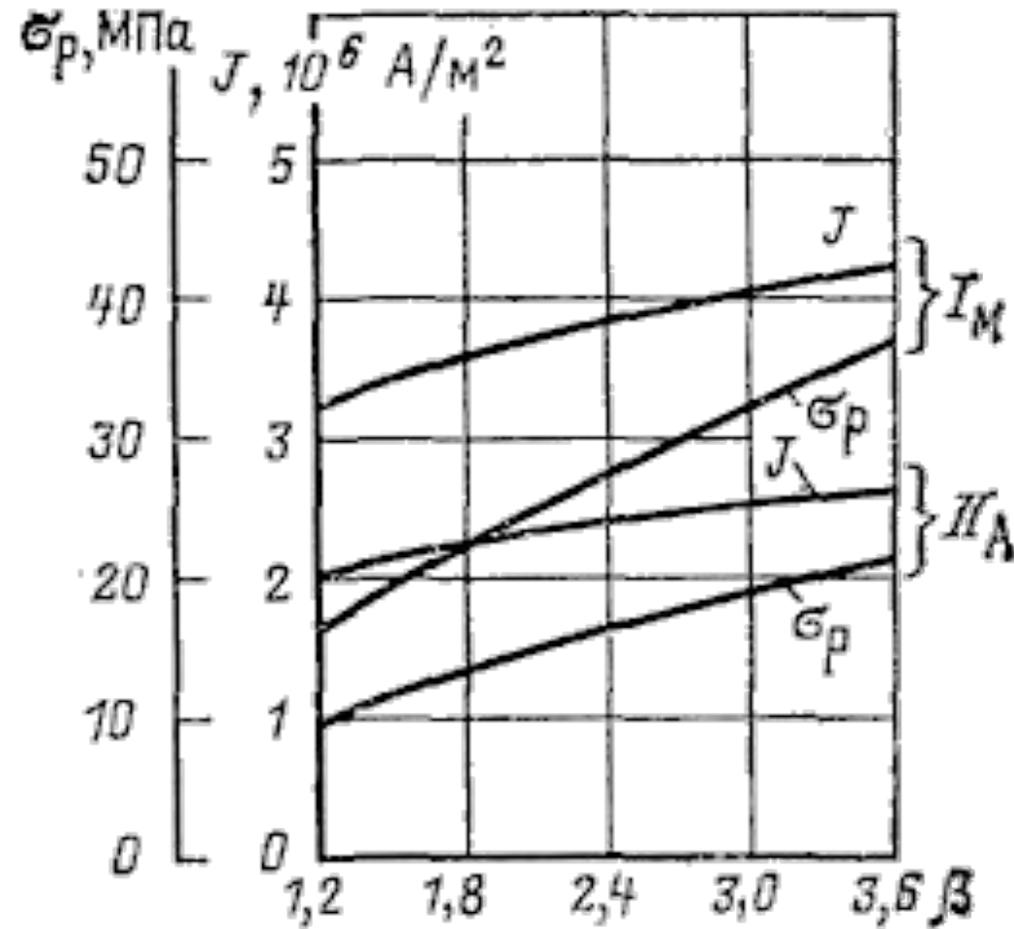
Изменение относительной стоимости активной части с изменением  $\beta$  для трансформатора типа ТМ-1600/35 с медными ( $I_M$ ) и алюминиевыми обмотками ( $I_A$ )

## Влияние $\beta$ на параметры трансформатора



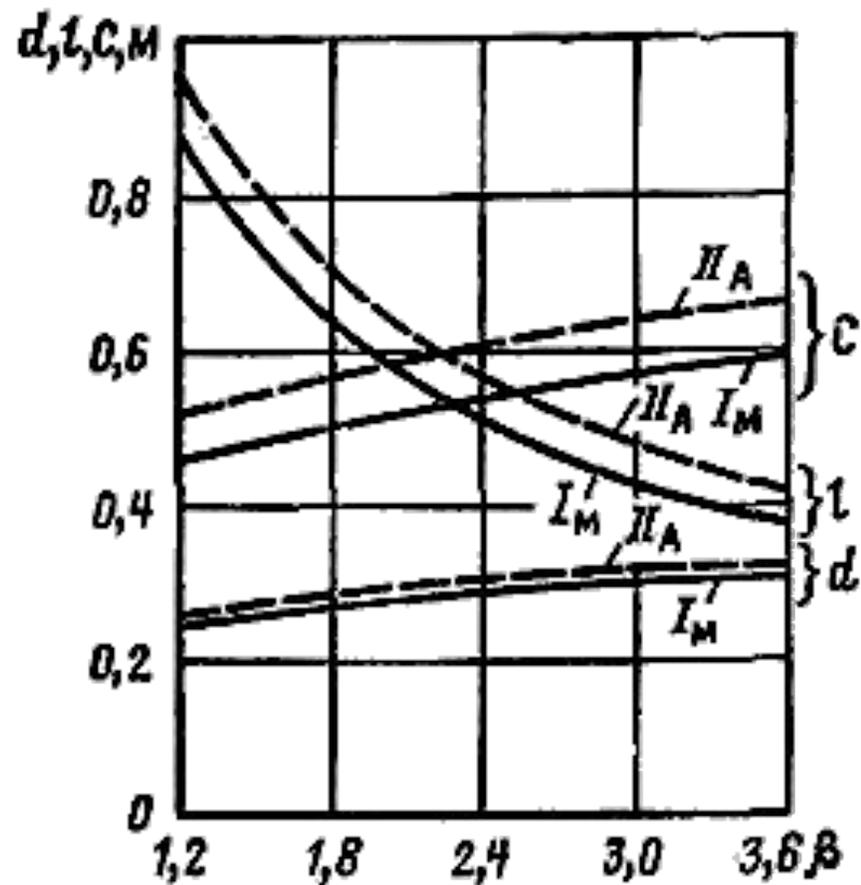
Изменение потерь и тока холостого хода с изменением  $\beta$  для трансформатора типа ТМ-1600/35 с медными ( $I_m$ ) и алюминиевыми обмотками ( $I_A$ )

## Влияние $\beta$ на параметры трансформатора



Изменение механических напряжений и плотности тока с изменением  $\beta$  для трансформатора типа ТМ-1600/35 с медными ( $I_M$ ) и алюминиевыми обмотками ( $I_A$ )

## Влияние $\beta$ на параметры трансформатора

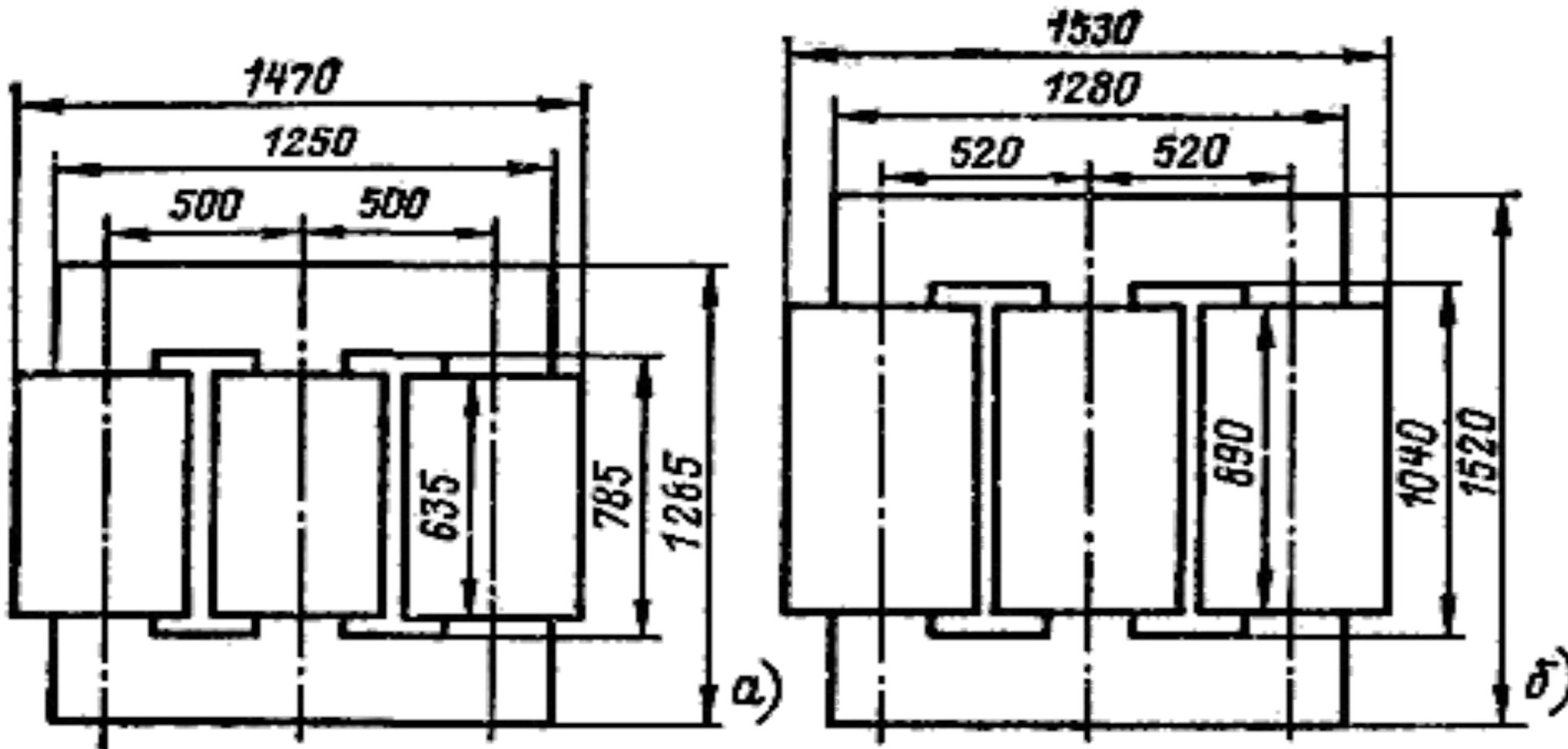


Изменение основных размеров - диаметра стержня  $d$ , высоты обмотки  $l$  и расстояния между осями стержней  $C$  с изменением  $\beta$  для трансформаторов типа ТМ-1600/35 с медными ( $I_M$ ) и алюминиевыми ( $II_A$ ) обмотками

## Влияние $\beta$ на параметры трансформатора

- Изменение  $\beta$  влияет на массу не только активных, но и остальных материалов трансформаторов.
- Вместе с увеличением  $\beta$  растут потери холостого хода и стоимость системы охлаждения, возрастают масса и стоимость конструктивных деталей остова, металла бака, трансформаторного масла, общая масса трансформатора.
- Общая стоимость материалов трансформатора имеет свою точку минимального значения, обычно близкую по шкале значений  $\beta$  к точке минимальной стоимости активных материалов.
- С увеличением  $\beta$  от этой точки общая стоимость материалов резко возрастает.
- Поэтому в целях экономии всех материалов трансформатора рекомендуется при прочих равных условиях выбирать меньшие из рекомендуемых значений  $\beta$ .

**Основные размеры двух трансформаторов типа ТМ-1600/35 с медными (а) и  
алюминиевыми (б) обмотками**



## Влияние $\beta$ на параметры трансформатора

- Подобное исследование, проведенное для ряда трансформаторов современных серий, показало, что общий характер изменения экономических и технических параметров с изменением  $\beta$  отличается теми же закономерностями, что и в примере с трансформатором типа ТМ-1600/35.
- Однако для трансформатора каждого типа получаются свои пределы оптимального значения  $\beta$ .
- Так для трансформаторов с воздушным охлаждением с изоляцией обмоток повышенных классов нагревостойкости от В до Н вследствие относительно высоких цен изоляционных материалов минимум стоимости активной части сдвигается в зону более высоких значений  $\beta$ , где уменьшается масса металла обмоток и изоляции при относительном увеличении массы стали.

## Последовательность определения основных размеров трансформатора

- Определяется диаметр стержня, который зависит от:
  - заданных параметров –  $S, f, U_p$ ;
  - выбранных параметров –  $V_c, \beta, K_p$ ;
  - рассчитанных предварительно параметров - *коэффициент заполнения активным сечением стали площади круга, описанного около сечения стержня -  $K_c$ ; ширина приведенного канала рассеяния трансформатора -  $a_p$ .*
- Если полученный диаметр  $d$  не соответствует **нормализованной шкале** диаметров, то следует принять ближайший диаметр по нормализованной шкале  $d_H$  и определить значение  $\beta_H$ , соответствующее нормализованному диаметру.
- Определяется второй основной размер трансформатора — средний диаметр канала между обмотками  $d_{12}$ , зависящий от диаметра стержня и радиальных размеров осевых каналов между стержнем и обмоткой НН и между обмотками НН и ВН, которые определяются из условий электрической прочности главной изоляции трансформатора по испытательным напряжениям обмоток НН и ВН.
- Определяется третий основной размер трансформаторов — высота обмотки -  $l$  по коэффициенту  $\beta$  и  $d_{12}$ .

## Выбор типа обмотки

- Выбор типа конструкции обмоток при расчете трансформатора должен производиться с учетом эксплуатационных и производственных требований, предъявляемых к трансформаторам.
- На выбор конструкции обмотки влияют:

□ ток нагрузки одного стержня -  $I_c$ ;

□ мощность трансформатора -  $S$ ;

□ номинальное напряжение -  $U_n$ ;

□ поперечное сечение витка обмотки -  $\Pi$ .

- Ориентировочное сечение витка каждой обмотки,  $\text{м}^2$ , может быть определено по формуле

- $$\Pi = I_c / J_{cp},$$

- где  $I_c$  — ток соответствующей обмотки одного стержня, А;  $J_{cp}$  — средняя плотность тока в обмотках ВН и НН, А/м<sup>2</sup>.

## Определение средней плотности тока в обмотках

- Выбор средней плотности тока в обмотках не является произвольным.
- Когда выбирается тип обмотки, уже известны основные размеры магнитной системы, ЭДС одного витка и числа витков в каждой из обмоток, а также ориентировочные основные размеры обмотки (внутренний диаметр и высота).
- *В зависимости от выбора значения  $J_{cp}$  будут изменяться объем и масса обмоток, а следовательно, и основные потери в них  $P_{осн}$*
- Обычно при расчете трансформатора потери короткого замыкания  $P_k$  бывают заданы и выбор средней плотности тока должен быть связан с заданной величиной  $P_k$ .
- Для определения средней плотности тока в обмотках, А/м<sup>2</sup>, обеспечивающей получение заданных потерь короткого замыкания, можно воспользоваться формулой:

$$J_{cp} = k \cdot k_{\partial} \frac{P_k \cdot U_v}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4$$

- где коэффициент  $k$  зависит от материала обмотки: для меди – 0,746; для алюминия – 0,463.

## Определение средней плотности тока в обмотках

- Найденное по формуле значение плотности тока является ориентировочным средним значением для обмоток ВН и НН.
- Действительная средняя плотность тока в обмотках должна быть близка к этому значению.
- *Плотности тока в каждой из обмоток масляного трансформатора с медными или алюминиевыми обмотками могут отличаться от среднего значения не более чем на 10 %.*
- Отклонение действительной средней плотности тока от найденной по формуле в сторону возрастания увеличивает потери короткого замыкания  $P_k$  и в сторону уменьшения—снижает.
- *В сухих трансформаторах вследствие существенного различия условий охлаждения для внутренних и наружных обмоток плотность тока во внутренней обмотке НН обычно снижают на 20-30 % по сравнению с плотностью в наружной обмотке ВН.*
- Поэтому в таких трансформаторах отклонение действительной плотности тока в обмотках от найденного среднего значения может достигать  $\pm(15—20) \%$ .

## Последовательность расчета обмоток НН

- Определяют число витков обмотки НН.
- Полученное значение  $w_2$  округляется до ближайшего целого числа и может быть как четным, так и нечетным/
- *После округления числа витков определяют напряжение одного витка,  $U_v$ ,*

$$u_v = U_{\phi 2} / w_2$$

- Определяют действительную индукцию в стержне, Тл,

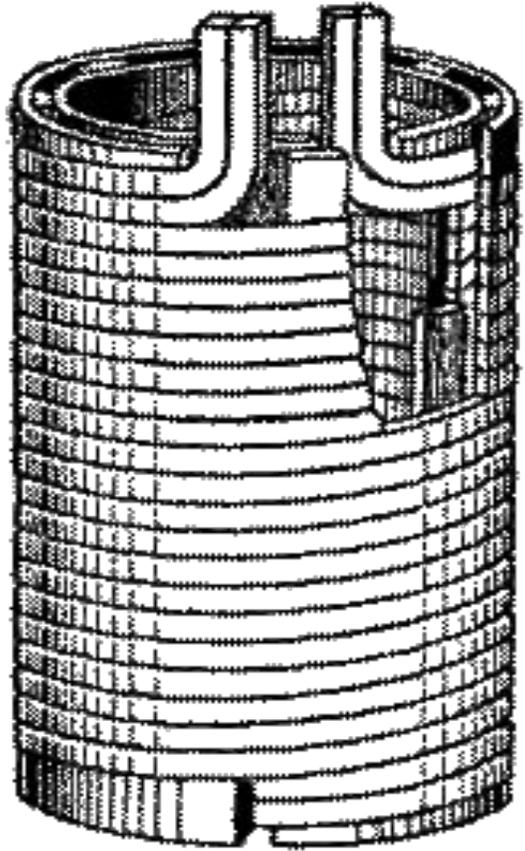
$$B_c = u_v / (4,44f\Pi_c)$$

- Дальнейший расчет для каждого типа обмоток НН производится различными методами.
- Цель расчета обмоток:

*□ уточнение осевого размера обмоток -  $l$  ;*

*□ определение радиальных размеров обмоток – внутреннего и внешнего диаметров.*

# Расчет двухслойных и однослойных цилиндрических обмоток из прямоугольного провода



1. Выбор числа слоев обмотки:

□ Число слоев выбирается обычно равное двум.

□ Для трансформаторов мощностью на один стержень до 6—10 кВ·А обмотка может быть намотана в один слой;

□ Для более мощных трансформаторов — в три слоя (редко).

2. Определяется число витков в одном слое.

3. Определяется ориентировочный осевой размер витка -  $h_{в1}$ .

4. Определяется ориентировочное сечение витка -  $\Pi_2'$ .

5. По полученным значениям  $\Pi_1'$  и  $h_{в1}$  по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбираются подходящие провода.

## Правила, которые нужно соблюдать при выборе провода

- число параллельных проводов  $n_{в1}$  не более 4—6 при намотке плашмя и не более 6—8 при намотке на ребро;
- все провода имеют одинаковые размеры поперечного сечения;
- радиальные размеры всех параллельных проводов витка равны между собой;
- радиальные размеры проводов не выходят за предельные размеры, найденные по [по предельному  \$q\$](#)  (обычно для масляных трансформаторов  $q \leq 1200 \text{ Вт/м}^2$  и в редких случаях  $q \leq 1400 \text{ Вт/м}^2$ ) или по допустимым добавочным потерям (обычно не более 5 %).
- В сухих трансформаторах следует принимать  $q \leq 280 \text{ Вт/м}^2$  при классе нагревостойкости изоляции А и  $320 \text{ Вт/м}^2$  при классе В;
- при намотке на ребро отношение радиального размера провода к осевому его размеру не менее 1,3 и не более 3;
- расчетная высота обмотки  $(\omega_{сл1} + 1) / h_{в1}$  на 5—15 мм меньше  $l$ .

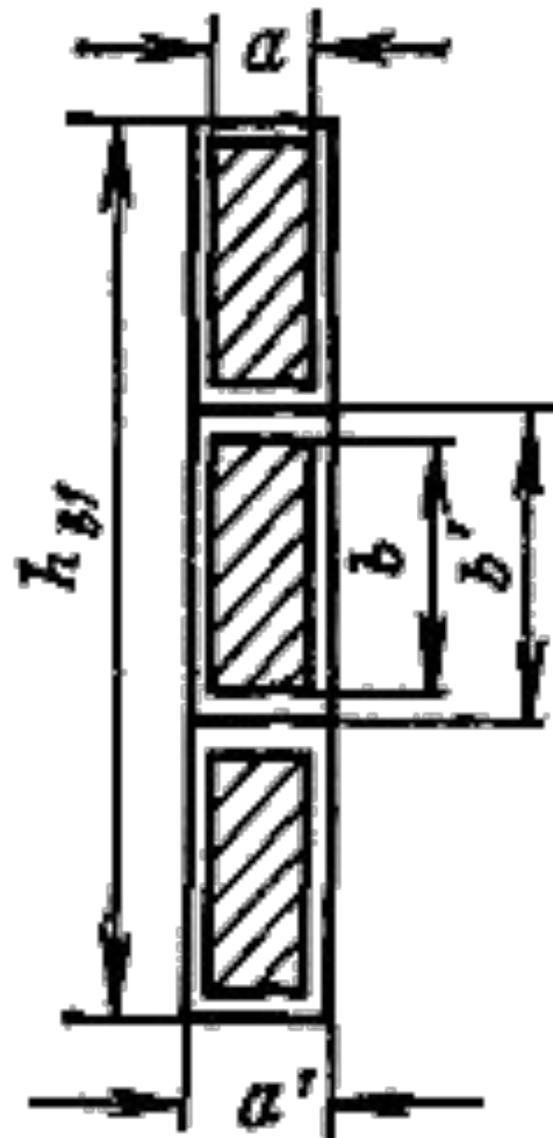
# Расчет двухслойных и однослойных цилиндрических обмоток из прямоугольного провода

- Выбранный провод:

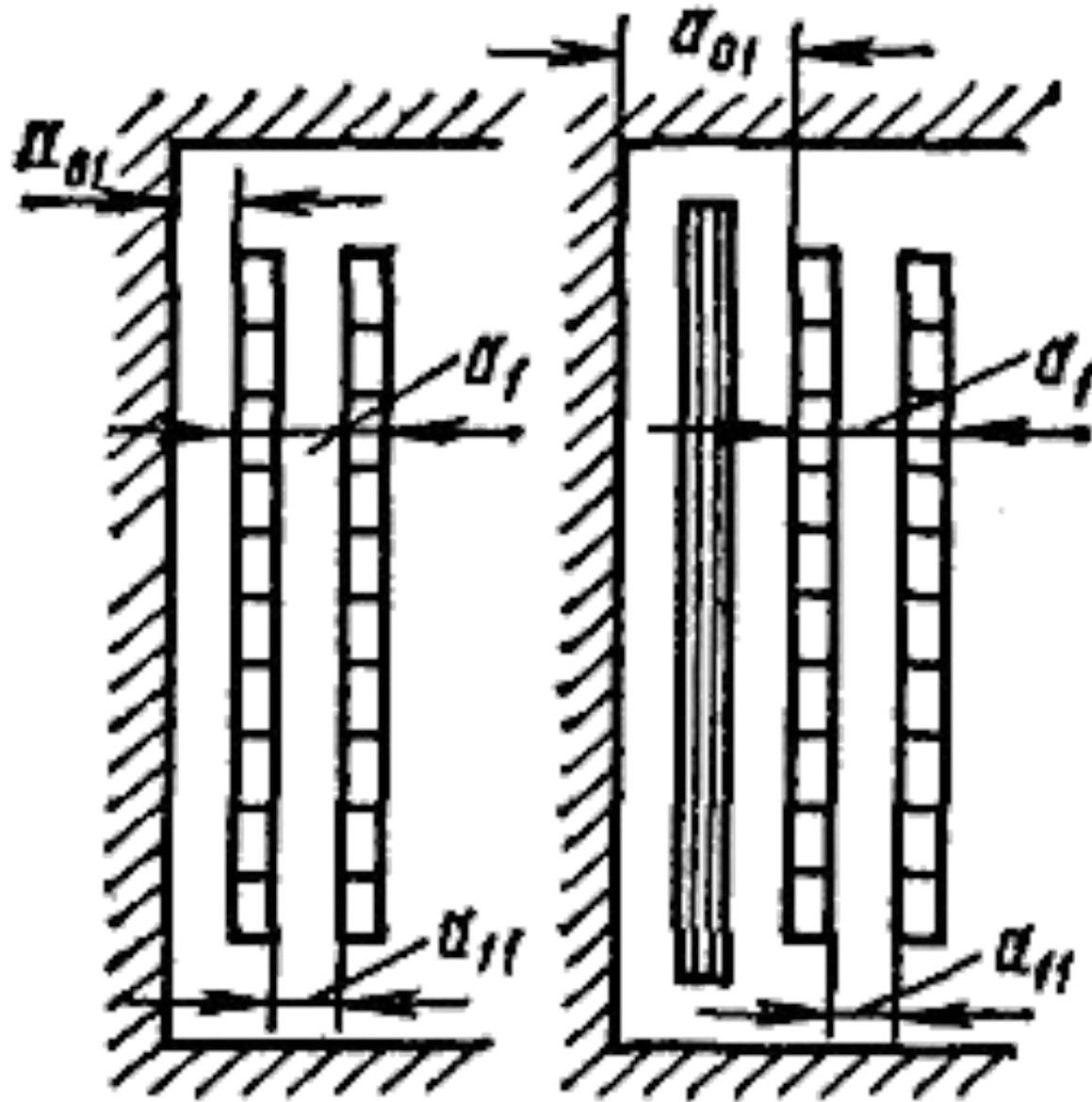
$$n_{\epsilon 2} \times \frac{a \times b}{a^1 \times b^1}$$

- Определяется полное сечение витка из  $n_{\epsilon 1}$  параллельных проводов –  $\Pi_2$ .
- Определяется плотность тока -  $J_2 = I_2 / \Pi_2$ .
- Определяется осевой размер витка –  $h_{\epsilon 2} = n_{\epsilon 2} b' \cdot 10^{-3}$
- Определяется осевой размер обмотки -  $l_2 = h_{\epsilon 2} (w_{\text{сл}2} + 1) + (0,005 - 0,015)$ .
- Определяется радиальный размер обмотки:
  - однослойной –  $a_2 = a' \cdot 10^{-3}$ ;
  - двухслойной -  $a_2 = (2 a' + a_{11}) \cdot 10^{-3}$
- Определяются внутренний и наружный диаметры обмотки.

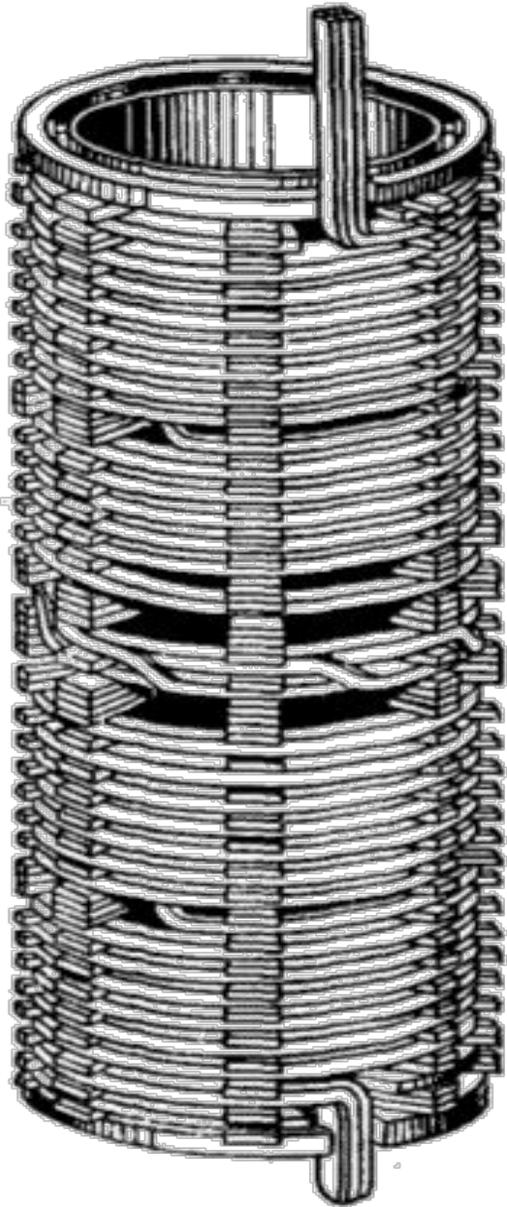
## Определение высоты витка



## Определение радиальных размеров обмотки



## Расчет винтовой обмотки



Выбор одноходовой или двухходовой (многоходовой) обмотки зависит от осевого размера (высоты) одного витка,  $m$ , ориентировочно определяемого по формулам:

для одноходовой обмотки:

$$h_{\text{в}1} \approx l_1 / (\omega_1 + 4) - h_{\text{к}1};$$

для двухходовой обмотки с равномерно распределенной транспозицией:

$$h_{\text{в}1} \approx l_1 / (\omega_1 + 1) - h_{\text{к}1};$$

где  $h_{\text{к}1}$  — осевой размер масляного охлаждающего канала между витками. Ориентировочно значение  $h_{\text{к}1}$  может быть принято равным  $h_{\text{к}1} \approx 0,1a_1$ , но не менее 4 мм.

## Выбор вида винтовой обмотки и расчет

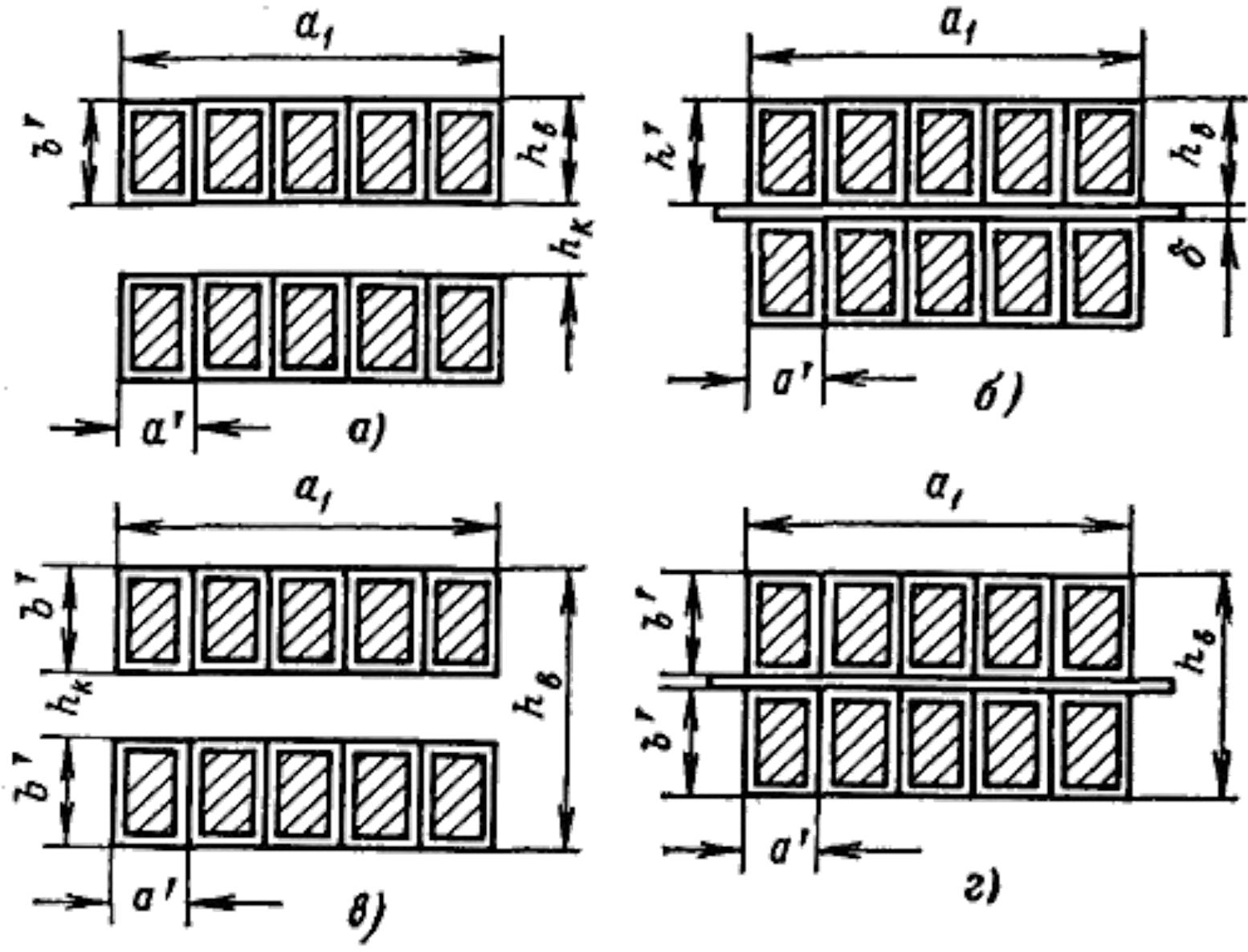
- **Максимально возможный осевой размер витка** одноходовой обмотки равен максимальному размеру обмоточного провода в изоляции, т.е. не может превышать **16,5 мм для медного** и **18,5 мм для алюминиевого провода**.
- Поэтому, если рассчитанная высота витка  $h_{в2} \leq 0,0165\text{ м}$  (16,5мм) для медного провода и  $h_{в1} \leq 0,0185\text{ м}$  (18,5мм) для алюминиевого, то следует применять одноходовую обмотку.
- При высоте витка  $0,035 - 0,045 \geq h_{в2} \geq 0,0155 - 0,0185\text{ м}$  (т.е.  $35 - 45 \geq h_{в2} \geq 15,5 - 18,5\text{ мм}$ ) применяется двухходовая обмотка.
- Определяется ориентировочное сечение витка  $\Pi_2$ .
- После определения числа ходов обмотки следует проверить полученный осевой размер витка  $h_{в2}$  по допустимой плотности теплового потока на поверхности обмотки  $q$  по формулам или графикам.
- Если найденный осевой размер витка  $h_{в2}$  составляет *не более половины  $b$* , найденного по этим формулам или графикам, то в одноходовой обмотке *можно сделать радиальные каналы через два витка*.
- В двухходовой обмотке масляный канал между двумя группами проводов витка можно заменить *прокладкой с толщиной  $2 \times 0,5\text{ мм}$ , если  $h_{в2} - h_{к1} \leq b$* .
- Если плотность тока в медном проводе обмотки *не превышает  $2,2 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^6\text{ А/м}^2$*  и в алюминиевом  $1,4 \cdot 10^6 - 1,8 \cdot 10^6\text{ А/м}^2$ , *возможно применение винтовой обмотки без радиальных каналов с плотным прилеганием витков*.

## Последовательность расчета винтовой обмотки

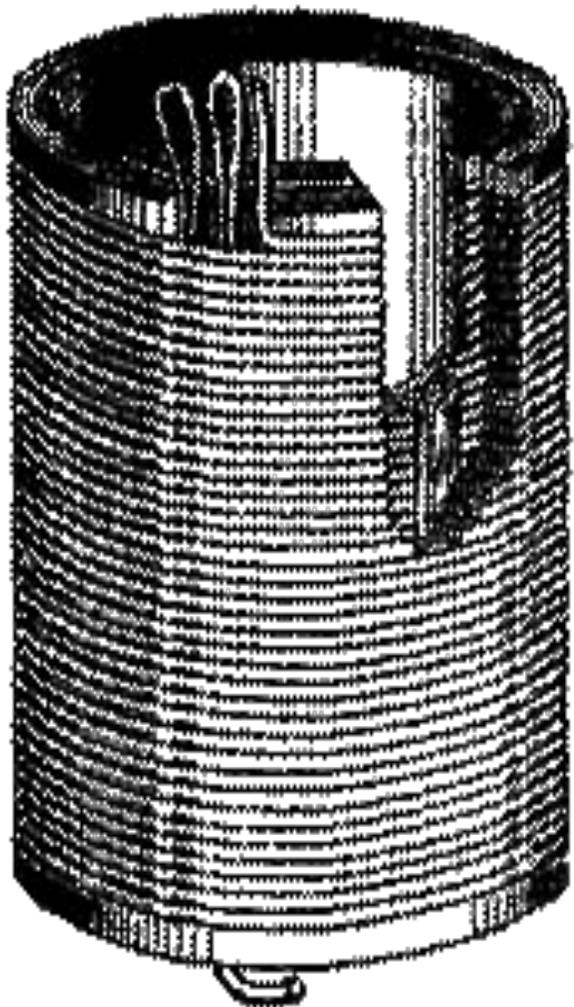
- После окончательного выбора конструкции обмотки к полученным ориентировочным значениям  $\Pi_2'$  и  $n_{в2}$  по сортаменту обмоточного провода подбираются подходящие сечения провода с соблюдением следующих требований:
  - **минимальное число параллельных проводов** в одноходовой обмотке **четыре**, в двухходовой — **восемь**;
  - все параллельные провода имеют одинаковые размеры и площадь поперечного сечения;
  - в обмотке с радиальными каналами **большой размер провода не выходит** за предельный размер, найденный по формулам или по графикам по предельно допустимому значению плотности теплового потока -  $q$ ;
  - в обмотке без радиальных каналов радиальный размер и число проводов в радиальном направлении выбраны с учетом допустимого значения  $q$  и допустимого уровня добавочных потерь;
  - **расчетная высота обмотки** при выбранных размерах проводов и радиальных каналов **равна предварительно рассчитанному значению**.
- Выбранные размеры проводов, мм:

$$n_{в2} \times \frac{a \times b}{a^1 \times b^1}$$

# Определение осевого размера витка и радиального размера для винтовой обмотки



## Расчет многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода



1. Определяется ориентировочное сечение витка.
2. По этому сечению и сортаменту обмоточного провода для трансформаторов подбирается круглый провод подходящего сечения или в редких случаях два параллельных одинаковых провода с диаметрами провода без изоляции  $d_2$  и провода в изоляции  $d_2'$ , мм.

3. Выбранный провод 
$$n_{\text{в1}} \times \frac{d}{d^1}$$

где  $n_{\text{в1}}$  — число параллельных проводов.

4. Определяется сечение витка.
5. Определяется плотность тока.
6. Определяется число витков в слое:

$$w_{\text{сл1}} = l_2 10^{-3} / (n_{\text{в1}} d_1') - 1$$

7. Определяется число слоев в обмотке:

$$n_{\text{сл1}} = w_I / w_{\text{сл1}}$$

$n_{\text{сл1}}$  округляется до ближайшего большего числа

8. Определяются радиальные размеры обмотки с учетом толщины междуслойной изоляции.

## Расчет обмотки ВН

- Выбирается способ регулирования напряжения, если не задан, и схемы выполнения ответвлений для регулирования.
- Предусмотрены два вида регулирования напряжения силового трансформатора:
  - регулирование напряжения переключением ответвлений обмотки без возбуждения (**ПБВ**) после отключения всех обмоток трансформатора от сети;
  - регулирование напряжения без перерыва нагрузки (**РПН**) и без отключения обмоток трансформатора от сети.
- Для трансформаторов с **ПБВ** диапазон регулирования с числом ступеней регулирования – 5: **+5%; +2,5%; 0; -2,5%; -5%.  $\pm 5\%$**
- Трансформаторы мощностью 400 и 630 кВ·А классов напряжения 10 и 35 кВ могут выпускаться с устройствами РПН по согласованию между потребителем и изготовителем.
- Для других трансформаторов устанавливаются следующие пределы регулирования:
  - *Двухобмоточные трансформаторы*
  - **1000—6300 кВ·А, 20 и 35 кВ -  $\pm 6 \times 1,50 = \pm 9\%$**
  - **2500 кВ·А, 110 кВ, РПН на стороне НН -  $+10 \times 1,50 = 15\%$ ;  $-8 \times 1,50 = -12\%$**
  - **6300—125000 кВ·А, 110 кВ -  $\pm 9 \times 1,67 = \pm 16\%$**

## Расчет обмоток ВН

- Определяется число витков, необходимого для получения номинального напряжения, для напряжений всех ответвлений.
- *Осевой размер обмотки ВН  $l_1$  принимается равным ранее определенному осевому размеру обмотки НН  $l_2$*
- Определяется плотность тока в обмотке ВН.
- Определяется сечение витка – ***П***.
- Выбирается провод.
- Определяются радиальные размеры обмотки с учетом изоляционных расстояний главной изоляции и наличия охлаждающих каналов в самой обмотке.