

## 1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 1.1 Номинальный (линейный) ток обмотки ВН, А

$$I_{ВН} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 24.06$$

### 1.2 Номинальный (линейный) ток обмотки НН, А

$$I_{НН} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0.69 \cdot 10^3} = 209.19$$

### 1.3 Фазный ток обмотки ВН (действующее значение), А

$$I_{фВН} = \frac{I_{ВН}}{\sqrt{3}} = \frac{24.06}{\sqrt{3}} = 13.89$$

### 1.4 Фазный ток обмотки НН (действующее значение), А

$$I_{фНН} = I_{НН} = 209.19$$

### 1.5 Фазное напряжение обмотки ВН (действующее значение), В (соединение треугольник)

$$U_{фВН} = U_{ВН} = 6 \cdot 10^3$$

### 1.6 Фазное напряжение обмотки НН (действующее значение), В (соединение звезда)

$$U_{фНН} = \frac{U_{НН}}{\sqrt{3}} = \frac{0.69 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 398.37$$

### 1.7 Нормированные испытательные напряжения обмоток трансформатора, В

$$U_{исп.ВН} = 25 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad U_{исп.НН} = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

### 1.8 Изоляционные расстояния главной изоляции в трансформаторе

$l_{01} = 15$  мм (Опорная изоляция из дерева или электрокартона)

$a_{12} = 9$  мм (Воздушный промежуток с бумажно-бакелитовым цилиндром толщиной)

$l_{02} = 30$  мм (Опорная изоляция из электрокартона)

$a_{22} = 10$  мм (Воздушный промежуток из картона с перегородкой из электрокартона толщиной )

$a_{01} = 4$  мм (Воздушный промежуток с бумажно-бакелитовым цилиндром толщиной)

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Наиболее распространенной конструкцией силового трансформатора является плоская магнитная система стержневого типа со ступенчатой формой поперечного сечения стержня и ярма, вписанного в окружность, и с концентрическим расположением обмоток.

2.1 Диаметр стержня трансформатора  $d$  и марка стали магнитопровода влияют на главный экономический показатель – соотношение затрат обмоточного провода и стали магнитопровода. После определения диаметра стержня его величина уточняется по нормализованному ряду:  $d_n = 0,08; 0.085; 0.09; 0.092; 0.095; 0.10; 0.105; 0.11; 0.115; 0.12; 0.125; 0.13; 0.14; 0.15; 0.16; 0.17; 0.18; 0.19; 0.20; 0.21; 0.22; 0.225; 0.23; 0.24; 0.245; 0.25; 0.26; 0.27; 0.28; 0.29; 0.30; 0.31; 0.32$ .

Принимаем  $d_n = 0.16$  м

2.2 Ориентировочная высота обмоток, выполненных из алюминиевого провода, м

$$l = 4.5 \cdot \frac{d_n}{\beta} = 4.5 \cdot \frac{0.16}{1.63} = 0.64$$

$\beta = 1.63$  - коэффициент геометрии трансформатора

2.3 Активное сечение стержня, м<sup>2</sup>

$$P_c = P_{\phi c} \cdot k_3 \cdot 10^{-4} = 183.5 \cdot 0.95 \cdot 10^{-4} = 0.017$$

$P_{\phi c} = 18355$  см<sup>2</sup> – сечение стержня

$k_3 = 0.95$  – коэффициент заполнения ступенчатой фигуры сталью

### 3. РАСЧЕТ ОБМОТОК НН И ВН

Как правило, ближе к стержню располагают обмотку НН, которую называют внутренней. Обмотку ВН называют наружной.

#### 3.1 Электродвижущая сила одного витка, В

$$U_B = 4.44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c = 4.44 \cdot 50 \cdot 1.6 \cdot 0.017 = 6.192 \text{ В}$$

Где:

$$B_c = 1.6 \text{ Тл}$$

$$f = 50 \text{ Гц}$$

где  $f$  - частота питающей сети;  $B_c$  - индукция в стержне;  $\Pi_c$  - активное сечение стержня

#### 3.2 Число витков обмотки НН (округленное значение)

$$W_{\text{НН}} = \frac{U_{\text{фНН}}}{U_B} = \frac{398.37}{6.192} = 65$$

#### 3.3 Заданный коэффициент трансформации

$$K_e = \frac{U_{\text{фВН}}}{U_{\text{фНН}}} = \frac{6 \cdot 10^3}{398.37} = 15.061$$

#### 3.4 Число витков обмотки ВН (округленное значение)

$$W_{\text{ВН}} = K_e \cdot W_{\text{НН}} = 15.061 \cdot 65 = 980$$

#### 3.5 Число витков для регулирования напряжения со стороны обмотки ВН

$$W_p = 0.05 \cdot W_{\text{ВН}} = 0.05 \cdot 980 = 49$$

3.6 Предварительное значение плотности тока для трансформаторов, с маслянным охлаждением.

$$j_{\text{ВН}} = 1.8 \text{ А/мм}^2$$

$$j_{\text{НН}} = 1.8 \text{ А/мм}^2$$

#### 3.7 Ориентировочное сечение витка обмотки ВН

$$\Pi_{\text{ВН}} = \frac{I_{\text{фВН}}}{j_{\text{ВН}}} = \frac{13.89}{1.8} = 7.72 \text{ мм}^2$$

#### 3.8 Ориентировочное сечение витка обмотки НН

$$\Pi_{\text{НН}} = \frac{I_{\text{фНН}}}{j_{\text{НН}}} = \frac{209.19}{1.8} = 116.21 \text{ мм}^2$$

### 3.10 Тип обмотки

ВН - цилиндрическая многослойная обмотка из круглого провода.

НН—цилиндрическая многослойная обмотка из прямоугольного провода.

#### 3.10.1 Расчет обмотки НН

##### Винтовая двухходовая обмотка из прямоугольного провода

##### 3.10.1.1 Ориентировочная высота витка

$$h_{\text{в}} = \frac{1}{W_{\text{сл}} + 1} = \frac{442}{65 + 1} = 13$$

Где:

$$W_{\text{сл}} = \frac{W_{\text{нн}}}{n_{\text{сл}}} = \frac{65}{5} = 13 - \text{число витков обмотки НН}$$

$n_{\text{сл}} = 5$  — число слоев обмотки

$n_{\text{эл}} = 5$  — число элементарных проводников.

##### 3.10.1.2 Ориентировочные осевые размеры изолированного элементарного проводника

$$b' = \frac{h_{\text{в}}}{n_{\text{эл}}} = 6.3$$

##### 3.10.1.3 Размеры элементарного неизолированного проводника

$$b = 6.3 \text{ мм}$$

$$a = 3.75 \text{ мм}$$

По таблице 3.3 выбран проводник:

$$\text{АПБ} \times 8 \times \frac{3.75 \times 6.3}{4.55 \times 7.1} \times 22.8$$

##### 3.10.1.4 Сечение витка

$$П_{\text{ннр}} = П_{\text{ГОСТ}} \cdot n_{\text{эл}} = 22.8 \cdot 5 = 114 \text{ мм}^2$$

##### 3.10.1.6 Уточненное значение плотности тока

$$j_{\text{ннр}} = \frac{I_{\text{фнн}}}{П_{\text{ннр}}} = \frac{209.19}{114} = 1.835$$

### 3.10.1.7 Осовой размер обмотки

$$l_{\text{нн}} = h_{\text{в.р.}} \cdot (W_{\text{нн}} + 1) = 31.5(65 + 1) = 441 \text{ мм.}$$

Где:

$$h_{\text{в.р.}} = n_{\text{эл}} \cdot b = 5 \cdot 6.3 = 31.5 \text{ мм} - \text{высота витка}$$

### 3.10.1.8 Радиальный размер обмотки, мм

$$a_1 = a' \cdot n_{\text{сл}} + \Delta_{\text{из}} \cdot (n_{\text{сл}} + 1) = 4.55 \cdot 5 + 0.24 \cdot (5 + 1) = 24.2 \text{ мм}$$

Где:

$\Delta_{\text{из}} = 0.24$  – междуслойная изоляция

### 3.10.1.9 Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = d_{\text{н}} + 2 \cdot a_{01} = 0.16 + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0.168 \text{ м}$$

### 3.10.1.10 Наружный диаметр обмотки, м

$$D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1 = 0.168 + 2 \cdot 24.2 \cdot 10^{-3} = 0.216 \text{ м}$$

### 3.10.1.11 Масса металла обмотки, кг

$$G_{\text{нн}} = 3\pi \frac{D'_1 + D''_1}{2} W_{\text{нн}} \cdot \Pi_{\text{ннр}} \cdot \gamma_{\text{Al}} = 3\pi \frac{0.168 + 0.216}{2} \cdot 65 \cdot 114 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 36.24 \text{ кг}$$

Где:

$$\gamma_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3$$

### 3.10.1.12 Поверхность охлаждения

$$\Pi_{\text{охл.нн}} = 3 \cdot k \cdot \pi \cdot (D'_1 + D''_1) \cdot l_{\text{нн}} = 3 \cdot 0.75 \cdot \pi \cdot (0.168 + 0.216) \cdot 441 = 1.198 \text{ м}^2$$

### 3.10.2 Расчет обмотки ВН

#### Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода

##### 3.10.2.1 Размеры проводника, мм.

$$P_{\text{ГОСТ}} = 7.795 \text{ мм}^2$$

$$d = 3.15 \text{ мм}$$

$$d_{\text{из}} = d + 2\delta = 3.15 + 2 \cdot 0,4 = 3.95 \text{ мм}$$

Был принят проводник:

$$\text{Провод АПБ} \times 1 \times \frac{3.15}{3.95} \times 7.795$$

##### 3.10.2.2 Уточненная плотность тока

$$j_{\text{внр}} = \frac{I_{\text{фвн}}}{P_{\text{внр}}} = \frac{13.889}{7.795} = 1.782$$

Где:

$$P_{\text{внр}} = P_{\text{ГОСТ}} \cdot n_{\text{эл}} = 7.795 \cdot 1 = 7.795 \text{ мм}^2$$

$$n_{\text{эл}} = 1$$

##### 3.10.2. 3 Число витков в слое

$$W_{\text{сл}} = \frac{l_{\text{нн}}}{n_{\text{эл}} \cdot d_{\text{из}}} - 1 = \frac{0,441}{1 \cdot 3.95} - 1 = 106 \text{ (округленное значение).}$$

##### 3.10.2.4 Число слоев в обмотке

$$n_{\text{сл}} = \frac{W_{\text{вн}} + W_{\text{р}}}{W_{\text{сл}}} = \frac{980 + 49}{106} = 9 \text{ (округленное значение).}$$

##### 3.10.2.5 Радиальный размер обмотки ВН:

-Обмотка без вертикальных каналов

$$a_2 = d_{\text{из}} \cdot n_{\text{сл}} + \Delta_{\text{из}}(n_{\text{сл}} - 1) = 3.95 \cdot 9 + 0.24 \cdot (9 - 1) = 37.47 \text{ мм}$$

##### 3.10.2.6 Высота обмотки ВН

$$l_{\text{вн}} = d_{\text{из}} \cdot n_{\text{эл}}(W_{\text{сл}} + 1) = 3.95 \cdot 1 \cdot (106 + 1) = 442.65 \text{ мм.}$$

### 3.10.2.7 Внутренний диаметр обмотки ВН

$$D_2' = D_1'' + 2a_{12} = 216 + 2 \cdot 9 = 234 \text{ мм.}$$

Где:

$a_{12}$  - изоляционное расстояние от обмотки НН до обмотки ВН

### 3.10.2.8 Наружный диаметр обмотки ВН

$$D_2'' = D_2' + 2a_2 = 234 + 2 \cdot 37.47 = 309 \text{ мм}$$

### 3.10.2.9 Поверхность охлаждения

- обмотка без вертикальных каналов

$$P_{\text{охл.ВН}} = 3k\pi(D_2' + D_2'')l_{\text{ВН}} = 3 \cdot 0.8 \cdot \pi(0.234 + 0.309) \cdot 0.42265 = 1.733 \text{ м}^2$$

Где:

$k = 0.8$  – коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности обмотки крепящими и изолирующими деталями.

### 3.10.2.10 Масса металла обмоток

$$G_{\text{ВН}} = 3\pi \frac{D_2' + D_2''}{2} W_{\text{ВН}} \cdot P_{\text{ВНр}} \cdot \gamma_{\text{Al}} = 3 \cdot \pi \cdot \frac{0.234 + 0.309}{2} \cdot 980 \cdot 7.795 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 \\ = 52.845 \text{ кг}$$

Где

$$\gamma_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3.$$

### 3.10.2.11 Масса металла обмоток НН и ВН

$$G_0 = G_{\text{НН}} + G_{\text{ВН}} = 36.24 + 52.845 = 89.085 \text{ кг}$$

#### 4. Потери короткого замыкания

##### 4.1 Основные потери в обмотках при расчетной температуре 75°C

$$P_{\text{оч.нн}} = 3 \cdot I_{\text{фнн}}^2 \cdot r_{\text{нн}75^\circ\text{C}} = 3 \cdot 209.185^2 \cdot 0.0012 = 1555 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{оч.вн}} = 3 \cdot I_{\text{фвн}}^2 \cdot r_{\text{вн}75^\circ\text{C}} = 3 \cdot 13.89^2 \cdot 3.694 = 2137 \text{ Вт}$$

Где:

$$r_{\text{нн}75^\circ\text{C}} = \rho_{75^\circ\text{C}} \cdot \frac{\pi \frac{D'_1 + D''_1}{2} \cdot W_{\text{нн}}}{\Pi_{\text{ннр}}} = 34.4 \cdot 10^{-3} \frac{\pi \frac{0.168 + 0.216}{2} \cdot 65}{114} = 0.0012 \text{ Ом}$$

$$r_{\text{вн}75^\circ\text{C}} = \rho_{75^\circ\text{C}} \cdot \frac{\pi \frac{D'_2 + D''_2}{2} \cdot W_{\text{вн}}}{\Pi_{\text{внр}}} = 34.4 \cdot 10^{-3} \frac{\pi \frac{0.234 + 0.309}{2} \cdot 980}{7.795} = 3.694 \text{ Ом}$$

$\rho_{75^\circ\text{C}} = 34.4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  – удельное сопротивление алюминиевого провода, приведенное к нормированной расчетной температуре обмоток +75°C.

##### 4.2 Средний коэффициент добавочных потерь

$$\begin{aligned} K_{\text{днн}} &= 1 + 0.037 \cdot \beta_1^2 \cdot a^4 \cdot n^4 \cdot 10^8 = \\ &= 1 + 0.037 \cdot 0.994^2 \cdot 0.00455^4 \cdot 5^4 \cdot 10^8 = 1.039 \end{aligned}$$

Где:

$$\beta_1 = 0.95 \frac{b \cdot m}{l_{\text{нн}}} = 0.95 \frac{0.0071 \cdot 65}{0.441} = 0.994$$

$m = W_{\text{сл}} \cdot n_{\text{эл}} = 13 \cdot 5 = 65$  число элементарных проводников по оси обмотки

$b$  - размер неизолированного проводника по оси обмотки;

$a$  - размер неизолированного проводника по радиусу обмотки,

$l$  - высота обмотки,

$$K_{\text{двн}} = 1 + 0.017 \cdot \beta_2^2 \cdot d^4 \cdot n_{\text{сл}}^2 \cdot 10^8 = 1 + 0.017 \cdot 0.751^2 \cdot 0.00315^4 \cdot 10^2 \cdot 10^8 = 1.008$$

Где:

$$\beta_1 = 0.95 \frac{d \cdot m}{l_{\text{вн}}} = 0.95 \frac{0.00315 \cdot 106}{0.42265} = 0.751$$

$m = W_{\text{сл}} \cdot n_{\text{эл}} = 106 \cdot 1 = 106$  – число элементарных проводников по оси обмотки

$d$  - диаметр неизолированного провода;

$l$  - высота обмотки,



$n = n_{\text{сл}}$  - число элементарных проводников по радиусу обмотки.

#### 4.3 Потери в отводах

$$P_{\text{отв.нн}} = 12.75 \cdot j_{\text{ннр}}^2 \cdot G_{\text{отв.нн}} = 12.75 \cdot 1.835^2 \cdot 1.038 = 44.554 \text{ Вт.}$$

Где

$$G_{\text{отв.нн}} = l_{\text{отв.нн}} \cdot \Pi_{\text{ннр}} \cdot \gamma_{\text{Al}} = 3.308 \cdot 114 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 1.038 \text{ кг, — вес отводов,}$$

$$l_{\text{отв.нн}} = 7.5 \cdot l_{\text{нн}} = 7.5 \cdot 0.441 \cdot 10^{-3} = 3.308 \text{ м — общая длина отводов.}$$

$$P_{\text{отв.вн}} = 12.75 \cdot j_{\text{внр}}^2 \cdot G_{\text{отв.вн}} = 12.75 \cdot 1.782^2 \cdot 0.123 = 4.99 \text{ Вт.}$$

Где

$$G_{\text{отв.вн}} = l_{\text{отв.вн}} \cdot \Pi_{\text{внр}} \cdot \gamma_{\text{Al}} = 5.917 \cdot 7.795 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 0.123 \text{ кг, — вес отводов,}$$

$$l_{\text{отв.вн}} = 14 \cdot l_{\text{вн}} = 14 \cdot 0.42265 = 5.917 \text{ м — общая длина отводов}$$

$$\gamma_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3; j - \text{А/мм}^2; \Pi - \text{м}^2$$

#### 4.4 Потери в баке и металлических конструкциях

$$P_{\delta} = 10 \cdot k_{\delta} \cdot S_{\text{н}} = 10 \cdot 0.015 \cdot 250 = 37.5 \text{ Вт.}$$

Где

$$k = 0.015; S_{\text{н}} - \text{подставляется в кВА.}$$

#### 4.5 Потери короткого замыкания трансформатора

$$\begin{aligned} P_{\text{кр}} &= P_{\text{осн.нн}} \cdot k_{\text{д.нн}} + P_{\text{осн.вн}} \cdot k_{\text{д.вн}} + P_{\text{отв.нн}} + P_{\text{отв.вн}} + P_{\delta} \\ &= 1555 \cdot 1.039 + 2137 \cdot 1.008 + 44.554 + 4.99 + 37.5 = 3856 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

$$\frac{P_{\text{кр}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}} = \frac{3856 - 3700}{3700} \cdot 100\% = 4.23 \%$$

#### 4.6 Плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности

-Обмотки НН

$$q_{\text{нн}} = \frac{P_{\text{осн.нн}} \cdot k_{\text{д.нн}}}{\Pi_{\text{охл.нн}}} = \frac{1555 \cdot 1.039}{1.198} = 1348 \text{ Вт/м}^2$$

-Обмотки ВН

$$q_{\text{вн}} = \frac{P_{\text{осн.вн}} \cdot k_{\text{д.вн}}}{\Pi_{\text{охл.вн}}} = \frac{2137 \cdot 1.08}{1.733} = 1243 \text{ Вт/м}^2$$

## 5. Напряжение короткого замыкания

Напряжение короткого замыкания  $U_k$  определяет внешнюю характеристику и ток короткого замыкания трансформатора. Величина  $U_k$  является паспортной величиной, и при расчете не допускается отклонение более чем на  $\pm 5\%$ .

Напряжение короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется приведенное к расчетной температуре напряжение, первичной обмотки в режиме короткого замыкания вторичной обмотки и номинальном токе в ней.

### 5.1 Параметры схемы замещения при коротком замыкании, Ом

$$r_k = r_1 + r'_2 = \frac{P_{кр}}{3 \cdot I_{фнн}^2} = \frac{3856}{3 \cdot 209.19^2} =$$

$= 0.029 \text{ Ом}$  – активное сопротивление обмоток,

$$r_1 \approx r'_2 = \frac{r_k}{2} = \frac{0.029}{2} = 0.015 \text{ Ом} \text{ – активное сопротивление первичной обмотки,}$$

$$r_2 = \frac{r'_2}{k_e^2} = \frac{0.015}{15.061^2} = 6.475 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \text{ – активное сопротивление вторичной}$$

обмотки,

$x_k$  - индуктивное сопротивление обмоток

$$x_1 \approx x'_2 = \frac{x_k}{2} = \frac{0.077}{2} = 0.038 \text{ Ом} \text{ – индуктивное сопротивление}$$

первичной обмотки, эквивалентное потоку рассеяния,

$$x_2 = \frac{x'_2}{k_e^2} = \frac{0.077}{15.061^2} = 1.69 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \text{ – Индуктивное сопротивление вторичной}$$

обмотки, эквивалентное потоку рассеяния.

### 5.2 Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_a = I_{фнн} \cdot r_k = 209.19 \cdot 0.029 = 6.145 \text{ В.}$$

### 5.3 Реактивная составляющая напряжения КЗ

$$U_p = I_{фнн} \cdot x_k = 209.19 \cdot 0.077 = 16.08 \text{ В.}$$

Где

$$x_k = \frac{7,9 \cdot f \cdot W_{\text{нн}}^2 \cdot \pi \cdot d_{12}}{l_\sigma} \cdot \left( a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-6} = \\ = \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 65 \cdot \pi \cdot 0,225}{0,454} \cdot \left( 0,009 + \frac{0,0242 + 0,0375}{3} \right) \cdot 10^{-6} = 0,077 \text{ Ом}$$

$$l_\sigma = l + \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi} = 0,43183 + \frac{0,009 + 0,0242 + 0,0375}{\pi} = \\ = 0,454 \text{ м} - \text{средняя длина силовой линии потока рассеяния,}$$

$d_{12} = d_{\text{н}} + 2 \cdot a_{01} + 2 \cdot a_1 + a_{12} = 0,16 + 2 \cdot 0,004 + 2 \cdot 0,0242 + 0,009 = 0,225 \text{ м} -$   
средний диаметр канала между обмотками,

$$l = \frac{l_{\text{нн}} + l_{\text{вн}}}{2} = \frac{0,441 + 0,42265}{2} = 0,43183 \text{ м.}$$

#### 5.4 Расчетное значение напряжения КЗ

$$U_{\text{кр}\%} = \sqrt{U_{a\%}^2 + U_{p\%}^2} = \sqrt{1,543^2 + 4,036^2} = 4,321 \%$$

Где:

$$U_{a\%} = \frac{U_a}{U_{\text{фнн}}} \cdot 100\% = \frac{6,145}{398,372} \cdot 100\% = 1,543 \%$$

$$U_{p\%} = \frac{U_p}{U_{\text{фнн}}} \cdot 100\% = \frac{16,08}{398,372} \cdot 100\% = 4,036 \%$$

$$\frac{U_{\text{кр}\%} - U_{\text{к}}}{U_{\text{кр}\%}} = \frac{4,321 - 4,5}{4,321} = -0,041$$

#### 5.5 Токи короткого замыкания

В соответствии с указанием ГОСТа 11677-85 токи короткого замыкания для силовых трансформаторов должны определяться следующим образом:

установившийся ток короткого замыкания  $I_{\text{к}}$  для двухобмоточного трансформатора (при  $S_{\text{н}} \leq 1000 \text{ кВА}$ )

$$I_{\text{к}} = 100 \cdot \frac{I_{\text{фнн}}}{U_{\text{кр}\%}} = 100 \cdot \frac{209,19}{4,321} = 4841 \text{ А.}$$

наибольший ударный ток короткого замыкания

$$I_{\text{к,уд}} = k_{\text{уд}} \sqrt{2} \cdot I_{\text{к}} = 1,95 \cdot 4841 = 9440 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Где:  $k_{\text{уд}} \sqrt{2} = 1,95$

### 5.6 Радиальная механическая сила на одну обмотку

$$F_p = 0.628 \cdot (I_{\text{к.уд}} \cdot W_{\text{нн}})^2 \cdot \beta \cdot k_p \cdot 10^{-6} = \\ = 0.628 \cdot (0.944 \cdot 10^3 \cdot 65)^2 \cdot 1.603 \cdot 0.949 \cdot 10^{-6} = 35.97 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Где:

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l} = \frac{\pi \cdot 0.255}{0.43183} = 1.603$$

$$k_p = 1 - \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l} = 1 - \frac{(9 + 24.19 + 37.47) \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0.43183} = 0.949$$

### 5.7 Тангенсальная растягивающая обмотку сила

$$F_\sigma = \frac{F_p}{2\pi} = \frac{35.97 \cdot 10^4}{2 \cdot \pi} = 5.725 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

### 5.8 Напряжение на растяжение в алюминиевом проводе

$$\sigma_p = \frac{F_\sigma}{W_{\text{нн}} + \Pi_{\text{нн}}} = \frac{5.725 \cdot 10^4}{65 + 114} = 7.579 \text{ Па}$$

## 6. Расчет магнитной цепи

Для нормализованного ряда диаметров стержней магнитных систем силовых трансформаторов нормализованы так же число ступеней в сечении стержня и ярма, размеры пакетов пластин, число, размеры и расположение охлаждающих каналов, а следовательно, и площади поперечных сечений стержня  $\Pi_{\text{фс}}$  и ярма  $\Pi_{\text{фя}}$  и объем угла  $V_y \cdot \Pi_{\text{фя}} V_y$

### 6.1 Активное сечение стержня

$$\Pi_c = 0.017 \text{ м}^2$$

### 6.2 Активное сечение ярма

$$\Pi_y = k_3 \cdot \Pi_{\text{фя}} = 0.95 \cdot 188.3 \cdot 10^{-4} = 0.018 \text{ м}^2$$

### 6.3 Индукция в стержне

$$B_c = \frac{U_B}{4.44 \cdot f \cdot \Pi_c} = \frac{6.122}{4.44 \cdot 50 \cdot 0.017} = 1.582 \text{ Тл}$$

Где:

$$U_B = \frac{U_{\text{фвн}}}{W_{\text{вн}}} = \frac{6 \cdot 10^3}{980} = 6.122 \text{ В}$$

### 6.4 Индукция в ярме

$$B_y = \frac{U_B}{4.44 \cdot f \cdot \Pi_y} = \frac{6.122}{4.44 \cdot 50 \cdot 0.017} = 1.542 \text{ Тл.}$$

### 6.5 Масса стали в стержнях

$$G_c = G'_c + G''_c = 193.1 + 10.16 = 203.26 \text{ кг}$$

$$G'_c = 3 \cdot \Pi_c \cdot l_c \cdot \gamma_{\text{ст}} = 3 \cdot 0.017 \cdot 0.48265 \cdot 7650 = 193.1 \text{ кг} - \text{масса стали а пределах окна магнитной системы}$$

$$l_c = l_{\text{вн}} + 2 \cdot l_{02} = 0.4226 + 2 \cdot 0.03 = 0.48265 \text{ м} - \text{высота стержня в пределах окна.}$$

$\gamma_{\text{ст}} = 7650 \text{ кг/м}^3$  – плотность стали.

$$G''_c = 3(\Pi_c \cdot d_n \cdot \gamma_{\text{ст}} - G_y) = 3 \cdot (0.017 \cdot 0.16 \cdot 7650 - 17.951) = 10.16 \text{ кг} - \text{масса стали стержней в пределах углов}$$

$$G_y = k_3 \cdot V_y \cdot \gamma_{\text{ст}} = 0.95 \cdot 2470 \cdot 10^{-6} \cdot 7650 = 17.951 \text{ кг.}$$

### 6.6 Масса стали в ярмах

$$G_y = G'_y + G''_y = 174.79 + 35.99 = 210.79 \text{ кг}$$

$$G'_{\text{я}} = 4 \cdot C \cdot \Pi_{\text{я}} \cdot \gamma_{\text{ст}} = 4 \cdot 0.319 \cdot 0.017 \cdot 7650 = 174.79 \text{ кг} - \text{масса стали ярм между осями крайних стержней}$$

$$G''_{\text{я}} = 2 \cdot G_{\text{я}} = 2 \cdot 17.99 = 365.99 \text{ кг}$$

$$G_{\text{y}} = 0.822 \cdot \Pi_{\text{я}} \cdot d_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{ст}} = 0.822 \cdot 0.017 \cdot 0.16 \cdot 7650 = 17.99 \text{ кг}$$

$$C = D_2'' + a_{22} = 0.309 + 0.01 = 0.319 \text{ м} - \text{расстояние между осями стержней.}$$

$a_{22}$  – изоляционное расстояние между обмотками ВН на соседних стержнях.

#### 6.7 Масса стали магнитопровода

$$G_{\text{ст}} = G_{\text{с}} + G_{\text{я}} = 203.26 + 210.79 = 414.05 \text{ кг.}$$

#### 6.8 Потери холостого хода

$$\begin{aligned} P_0 &= (1.03 \div 1.13) \left[ (1.07 \div 1.17) \left( p_{\text{с}} \cdot G_{\text{с}} + p_{\text{я}} \cdot G_{\text{я}} - 4 \cdot p_{\text{я}} \cdot G_{\text{y}} + \frac{p_{\text{с}} + p_{\text{я}}}{2} \cdot k_{\text{пу}} \cdot G_{\text{y}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \sum p_3 \cdot \Pi_3 \right] = \\ &= 1.1 \left[ 1.07 \left( 1.251 \cdot 203.26 + 1.168 \cdot 210.79 - 4 \cdot 1.168 \cdot 17.951 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1.251 + 1.168}{2} \cdot 13.13 \cdot 17.951 \right) + 630 \cdot 0.025 \right] = 793.48 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Где:

$$p_{\text{с}} = 1.251 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}} - \text{удельные потери в стали стержня,}$$

$$p_{\text{я}} = 1.168 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}} - \text{удельные потери в стали ярма,}$$

$$p_3 = 630 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}} - \text{удельные потери в стыке,}$$

$$k_{\text{пу}} = 13.13 - \text{коэффициент увеличения потерь в углах,}$$

$$\Pi_3 = 0.025 \text{ м}^2$$

Потери холостого хода должны отличаться от заданных в пределах

$$\frac{P_0 - P_{\text{x}}}{P_{\text{x}}} \cdot 100\% = \frac{793.48 - 780}{780} \cdot 100\% = 0.17 \%$$

## 6.9 Ток холостого хода.

6.9.1 Ток первичной обмотки трансформатора, возникающий при холостом ходе при номинальном синусоидальном напряжении и номинальной частоте, называется током холостого хода.

Расчет намагничивающего тока в трансформаторах выполняют по полной намагничивающей мощности, учитывающих как активную, так и реактивную составляющие

$$Q_x = (1.03 \div 1.13) \left[ (1.18 \div 1.56) \left( G_c \cdot q_c + G_y \cdot q_y - 4 \cdot q_y \cdot G_y + \frac{q_c + q_y}{2} \cdot G_y \cdot k_{ty} \cdot k_{тпл} \right) + \sum n_3 \cdot q_3 \cdot P_3 \right] =$$
$$= 1.13 \left[ 1.56 \left( 203.26 \cdot 1.675 + 210.79 \cdot 1.486 - 4 \cdot 1.486 \cdot 17.951 + \frac{1.675 + 1.486}{2} \cdot 17.951 \cdot 64.7 \cdot 0.015 \right) + 6 \cdot 22100 \cdot 0.025 \right] = 4912$$

Где:

$q_c = 1.675$  – полная удельная намагничивающая мощность в стержнях,

$q_y = 1.486$  – полная удельная намагничивающая мощность в ярмах,

$k_{ty} = 64.7$  – коэффициент увеличения увеличения намагничивающей мощности в углах

$q_3 = 22100$  – удельная полная намагничивающая мощность зазора стыка,

$k_{тпл}$  – коэффициент увеличения намагничивающей мощности в углах в зависимости от размеров пластин

$$k_{тпл} \cong (2.325 - 3.25 \cdot d_n) \cos 222 \cdot (B_c - 1.5) \cos 180 (0.3 - d_n) =$$
$$= (2.325 - 3.25 \cdot 0.16) \cos 222 \cdot (1.582 - 1.5) \cdot \cos 180 \cdot (0.3 - 0.16) =$$
$$= 0.015$$

$\sum n_3 \cdot q_3 \cdot P_3$  – намагничивающая мощность стыков

$$P_3 = \sqrt{2} \cdot P_c = 0.025 .$$

6.9.2 Относительное значение тока холостого хода в процентах номинального тока.

$$J_{xp} = \frac{Q_x}{10 \cdot S_H} = \frac{4912}{10 \cdot 250 \cdot 10^3} = 1965$$

## 7. Характеристики трансформатора

Изменение тока нагрузки трансформатора вызывает изменение падения напряжения и потерь активной мощности в его обмотках, что приводит к изменению вторичного напряжения и КПД трансформатора.

Кривая процентного изменения напряжения при номинальном токе ( $k_{\text{нГ}} = 1$ ) в зависимости от коэффициента мощности  $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$

$$\Delta U \% = k_{\text{нГ}} (U_{\text{а}} \% \cos \varphi_2 + U_{\text{р}} \% \sin \varphi_2) + \frac{k_{\text{нГ}}^2 (U_{\text{р}} \% \cos \varphi_2 - U_{\text{а}} \% \sin \varphi_2)^2}{200}$$

### 7.1 Характеристика $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$

Таблица 1.1

$\varphi_2$	$-90^\circ$	$-60^\circ$	$-30^\circ$	$-15^\circ$	0	$+15^\circ$	$+30^\circ$	$+60^\circ$	$+90^\circ$
$\sin \varphi_2$	-1	-0,866	-0,5	-0,259	0	0,29	0,5	0,866	1
$\cos \varphi_2$	0	0,5	0,866	0,966	1	0,966	0,866	0,5	0
$\Delta U \%$	-4.02	-2.667	-0.591	0.538	1.62	2.72	3.391	4.269	4.048

Характеристики изображены на рисунке 1.

### 7.2 Внешние характеристики $U_2 = f(k_{\text{нГ}})$ при $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$

Таблица 1.2

$k_{\text{нГ}}$		0	0,25	0,5	0,8	1	1,1
$\Delta U \%$	$\cos \varphi_2 = 1$	0	0.391	0.792	1.287	1.624	1.796
$U_2 = 100 - \Delta U \%$		100	99.61	99.21	98.71	98.38	98.2
$\Delta U \%$	$\cos \varphi_2 = 0,8$	0	0.916	1.835	2.942	3.683	4.054
$U_2 = 100 - \Delta U \%$		100	99.08	98.165	97.06	96.32	95.95

Характеристики изображены на рисунке 2.



### 7.3 Характеристики КПД $\eta = f(k_{\text{нг}})$ при $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{хр}} + k_{\text{нг}}^2 P_{\text{кр}}}{k_{\text{нг}} S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_{\text{хр}} + k_{\text{нг}}^2 P_{\text{кр}}}$$

Таблица 1.3

$k_{\text{нг}}$	0	0,25	0,5	1	1,1
$\eta, \cos \varphi_2 = 1$	1	0.984	0.986	0.982	0.981
$\eta, \cos \varphi_2 = 0,8$	1	0.98	0.983	0.977	0.976

Характеристики изображены на рисунке 3.