

НАУЧНО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО  
ФАКУЛЬТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИКИ

Отчет по лабораторной работе №2  
Расчет трансформатора

Выполнили студенты

Мовчан Игорь Евгеньевич

Демкин Алексей Игоревич

Ле Ван Хынг

Будков Ярослав Антонович

Маматов Александр Геннадьевич

Преподаватель

Санкт-Петербург  
2025

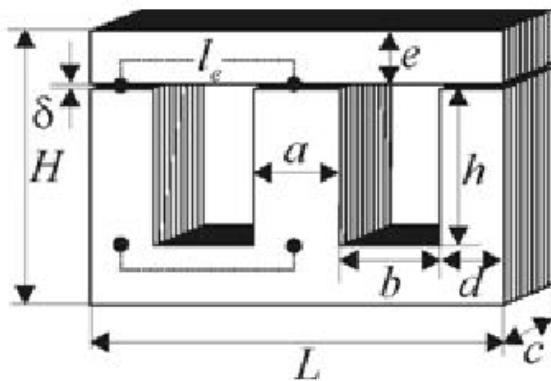
## Содержание

<b>1 Исходные данные</b>	<b>2</b>
<b>2 Расчет тока намагничивания</b>	<b>3</b>
<b>3 Расчет обмоток</b>	<b>6</b>
<b>4 Расчет потерь и КПД</b>	<b>7</b>
<b>5 Выводы</b>	<b>9</b>

## 1 Исходные данные

Имеем следующие исходные данные:

- Частота сети:  $f = 50$  Гц
- Напряжение первичной обмотки:  $U_1 = 230$  В
- Максимальная индукция в стержне:  $B_{\max} = 1.5$  Тл
- Плотность тока:  $J = 2.5$  А/мм<sup>2</sup>
- Коэффициент заполнения стали:  $k_{\text{ст}} = 0.9$
- Коэффициент заполнения окна:  $k_{\text{окн}} = 0.25$
- Материал сердечника: Э320
- Зазор в сердечнике:  $\delta = 0.05$  мм
- Напряжение вторичной обмотки:  $U_2 = 15$  В
- Размеры сердечника:  $H = 78$  мм,  $L = 67$  мм,  $a = 22$  мм,  $b = 14$  мм,  $c = 44$  мм,  $h = 39$  мм



*Рис. 1: Схема трансформатора*

## 2 Расчет тока намагничивания

Для меньших вычислений перейдем к эквивалентной схеме трансформатора:

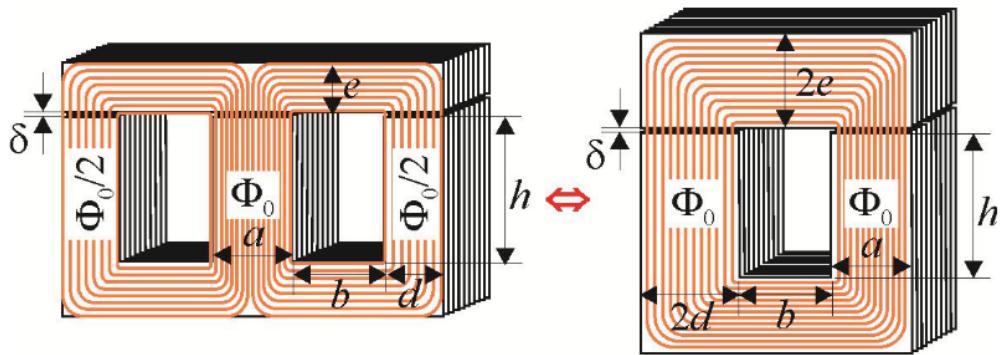


Рис. 2: Эквивалентная схема трансформатора

Вычислим дополнительные размеры сердечника:

$$d = \frac{L - 2b - a}{2} = 8.5 \text{ мм}$$

$$e = \frac{H - h}{2} = 19.5 \text{ мм}$$

А также площади сечений:

$$S_{2d} = 2d \cdot c = 748 \text{ мм}^2$$

$$S_{2e} = 2e \cdot c = 1716 \text{ мм}^2$$

$$S_a = a \cdot c = 968 \text{ мм}^2$$

Теперь пусть

$$B_0 = B_{max} = 1.5 \text{ Тл}$$

Будем рассчитывать индукцию относительно сечения  $S_{2d}$ :

$$B_{2d} = B_0 = 1.5 \text{ Тл}$$

$$B_a = B_0 \cdot \frac{S_{2d}}{S_a} \approx 1.159 \text{ Тл}$$

$$B_{2e} = B_0 \cdot \frac{S_{2d}}{S_{2e}} \approx 0.654 \text{ Тл}$$

Найдем напряженности, используя таблицу для стали Э320 (для недостающих значений используем линейное интерполирование):

Сталь электротехническая Э320; 0,35; $f=50\text{Гц}$									
$B_m$ [Тл]	0,5	1,0	1,25	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$H$ [А/см]	0,3	0,6	1,6	4,8	7,2	8,6	14,2	24,0	40,0
$p$ [Вт/кГ]	0,1	0,5	0,9	1,4	1,7	2,0	2,45	3,0	4,0
$q$ [Вар/кГ]	0,43	1,7	5,7	20,5	32,5	41,5	73,0	110	180

$B_m$  – максимальная индукция;  $H$  – напряженность;  $p$  – удельная мощность потерь в стали;  $q$  – удельная реактивная мощность (намагничивания).

*Rис. 3: Таблица для магнитной индукции*

$$H_{2d} = 480 \text{ А/м}, \quad H_a \approx 123.6 \text{ А/м}, \quad H_{2e} \approx 39.24 \text{ А/м}$$

Также вычислим напряженности в зазорах:

$$H_{2d\delta} = \frac{B_{2d}}{\sqrt{2}\mu_0} = \frac{1.5}{\sqrt{2} \cdot 4\pi 10^{-7}} \approx 844046.5464 \text{ А/м}$$

$$H_{a\delta} = \frac{B_a}{\sqrt{2}\mu_0} = \frac{1.159}{\sqrt{2} \cdot 4\pi 10^{-7}} \approx 652217.787 \text{ А/м}$$

Расчитаем магнитное напряжение, используя формулу:

$$U = H \cdot l$$

Тогда:

$$U_{2d} = H_{2d}h = 480 \cdot 0.039 = 18.72 \text{ А}$$

$$U_a = H_a h = 123.6 \cdot 0.039 = 4.8204 \text{ А}$$

$$U_{2e} = 2H_{2e} \cdot (2d + b + a) = 2 \cdot 39.24 \cdot (2 \cdot 0.039 + 0.039 + 0.039) = 4.15944 \text{ А}$$

$$U_\delta = (H_{2d\delta} + H_{a\delta})\delta = (844046.5464 + 652217.787) \cdot 0.039 = 74.81321667 \text{ А}$$

Наконец, суммарный ток намагничивания трансформатора:

$$I_\mu = U_{2d} + U_a + U_{2e} + U_\delta \approx 102.513 \text{ А}$$

Найдем также номинальный ток для оценки  $I_\mu$ :

$$I_p = \frac{b \cdot h \cdot k_{\text{окн}}}{2} J = 170.625 \text{ А.}$$

Получаем, что:

$$\frac{I_\mu}{I_p} > 0.4$$

Следовательно, индукцию  $B_0 = B$  надо уменьшить.

Пусть теперь  $B_0 = 1$  Тл. Тогда:

$$B'_{2d} = B_0 = 1 \text{ Тл}$$

$$B'_a = B_0 \cdot \frac{S_{2d}}{S_a} \approx 0.773 \text{ Тл}$$

$$B'_{2e} = B_0 \cdot \frac{S_{2d}}{S_{2e}} \approx 0.4359 \text{ Тл}$$

Найдем напряженности с использованием таблицы:

$$H'_{2d} = 60 \text{ А/м}, \quad H'_a \approx 34.1 \text{ А/м}, \quad H'_{2e} \approx 28 \text{ А/м}$$

Также вычислим напряженность в зазоре:

$$H'_{2d\delta} = \frac{B'_{2d}}{\sqrt{2}\mu_0} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 4\pi 10^{-7}} \approx 562697.7 \text{ А/м}$$

$$H'_{a\delta} = \frac{B'_a}{\sqrt{2}\mu_0} = \frac{0.773}{\sqrt{2} \cdot 4\pi 10^{-7}} \approx 434965.32 \text{ А/м}$$

Тогда:

$$U'_{2d} = H'_{2d} h = 60 \cdot 0.039 = 2.34 \text{ А}$$

$$U'_a = H'_a h = 0.341 \cdot 0.039 = 1.33 \text{ А}$$

$$U'_{2e} = 2H'_{2e} \cdot (2d + b + a) = 2 \cdot 28 \cdot (2 \cdot 8.5 + 14 + 22) = 2.968 \text{ A}$$

$$U'_\delta = (H'_{2d\delta} + H'_{a\delta})\delta = 49.883 \text{ A}$$

Наконец, суммарный ток намагничивания трансформатора:

$$I'_\mu = U'_{2d} + U'_a + U'_{2e} + U'_\delta \approx 56.521 \text{ A}$$

Получаем, что:

$$\frac{I'_\mu}{I_p} \approx 0.33 \leq 0.4$$

В итоге ток намагничивания трансформатора не превышает 40% от номинального тока обмотки.

### 3 Расчет обмоток

Определим мощность трансформатора:

$$S = 2.22fB_{max}S_ak_{ct}bhk_{okh}J \approx 49.5 \text{ Вт}$$

Число витков первичной обмотки:

$$W_1 = \text{round} \left( \frac{U_1}{4.44fS_aB_{max}k_{ct}} \right) \approx 792$$

Число витков вторичной обмотки:

$$W_2 = \text{round} \left( W_1 \frac{U_2}{U_1} \right) \approx 51$$

Отметим, что

$$\frac{k' - k}{k} < 0.03, \quad k' = \frac{W_1}{W_2}$$

Номинальные токи обмоток:

$$I_{1N} = \frac{I_p}{W_1} \approx 0.215 \text{ A}, \quad I_{2N} = \frac{I_p}{W_2} \approx 3.3456 \text{ A}$$

Вычислим сопротивления первичной и вторичной обмоток. Минимальные сечения проводов:

$$s'_1 = \frac{I_{1N}}{J} \approx 0.086 \text{ мм}^2, \quad s'_2 = \frac{I_{2N}}{J} \approx 1.338 \text{ мм}^2$$

Откуда сечения проводов:

$$s_1 = 0.01131 \text{ мм}^2, \quad s_2 = 1.4314 \text{ мм}^2$$

Получаем:

$$p_1 = 1.55 \text{ Ом/м}, \quad p_2 = 0.0122 \text{ Ом/м}$$

Также имеем:

$$L_{W1} = 2(a + c + 3b) = 216 \text{ мм}, \quad L_{W2} = 2(a + c + b) = 80 \text{ мм}$$

Откуда сопротивления обмоток:

$$R_1 = W_1 L_{w1} p_1 = 265.1616 \text{ Ом}, \quad R_2 = W_2 L_{w2} p_2 = 0.049776 \text{ Ом}$$

## 4 Расчет потерь и КПД

Медные потери:

$$\Delta P_{Cu} = R_1 I_{1N}^2 + R_2 I_{2N}^2 \approx 12.814 \text{ Вт}$$

Плотность сердечника:

$$\gamma = 7.8 \text{ кг/дм}^3 = 7800 \text{ кг/m}^3$$

Потери в стали можно вычислить по формуле:

$$\Delta P_{Fe} = G_a p(B'_a) + 2G_d p(B'_{2d}) + 2G_e p(B'_{2e})$$

Найдем соответствующие значения масс как плотность на объем:

$$G_a = \gamma \cdot a \cdot c \cdot h \approx 0.2945 \text{ кг}$$

$$G_d = \gamma \cdot d \cdot h \cdot c \approx 0.1 \text{ кг}$$

$$G_e = \gamma \cdot e \cdot b \cdot L = 0.14267 \text{ кг}$$

Также найдем удельные мощности потерь в стали:

$$p(B'_a) = 0.3184 \text{ Вт/кг}, \quad p(B'_{2d}) = 0.5 \text{ Вт/кг}, \quad p(B'_{2e}) = 0.08 \text{ Вт/кг}$$

И удельные реактивные мощности (намагничивания):

$$q(B'_a) \approx 1.12342 \text{ Вар/кг}, \quad q(B'_{2d}) = 1.7 \text{ Вар/кг}$$

$$q(B'_{2e}) = 0.4 \text{ Вар/кг}$$

Тогда потери в стали и системе из формулы выше:

$$\Delta P_{Fe} \approx 0.2166 \text{ Вт}$$

$$Q_{Fe} = G_a q(B'_a) + 2G_d q(B'_{2d}) + 2G_e q(B'_{2e}) \approx 0.785 \text{ Вар}$$

$$P_0 = \Delta P_{Cu0} + \Delta P_{Fe} = R_1 \left( \frac{I'_\mu}{W_1} \right)^2 + \Delta P_{Fe} \approx 1.35 \text{ Вт}$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_0 \approx \frac{1}{\sqrt{1 + (Q_{Fe}/P_0)^2}} \approx 0.7473$$

Оптимальный коэффициент нагрузки:

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cu}}} \approx 0.13$$

В итоге, номинальный КПД трансформатора:

$$\eta_N = \frac{U_1 I_{1N}}{U_1 I_{1N} + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}} \approx 0.79$$

Максимальный КПД трансформатора:

$$\eta_{max} = \frac{\beta_{max} U_1 I_{1N}}{\beta_{max} U_1 I_{1N} + \beta_{max}^2 \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}} \approx 0.937$$

## 5 Выводы

Был рассчитан трансформатор с использованием метода эквивалентной схемы. Из интересных результатов было получено:

- Мощность трансформатора составляет 49.5 Вт.
- КПД трансформатора в номинальном режиме составляет 0.79, а в максимальном режиме 0.937.