

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Факультет систем управления и робототехники

Электрические машины

Расчетная работа №1

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

ПО КОНСТРУКТИВНЫМ ИСХОДНЫМ ДАННЫМ

Вариант 2

Студент: Кирбаба Д.Д.

Группа: R3338

Преподаватель: Усольцев А.А.

г. Санкт-Петербург

2023

## Этапы расчёта

### Этап 1

По исходным данным определить:

- магнитные напряжения в зазоре, стержнях и в ярме магнитопровода;
- ток намагничивания (холостого хода) трансформатора при условии, что он не превышает 40% от номинального тока обмотки.

### Этап 2

Используя расчётные данные этапа 1, определить:

- мощность трансформатора;
- числа витков первичной и вторичной обмоток;
- номинальные токи первичной и вторичной обмоток;
- сопротивления первичной и вторичной обмоток.

### Этап 3

Используя расчётные данные этапов 1 и 2, определить:

- потери в обмотках трансформатора при номинальных токах;
- потери в сердечнике трансформатора;
- коэффициент мощности трансформатора в режиме холостого хода;
- оптимальный коэффициент нагрузки;
- номинальный и максимальный КПД.

Исходные данные для расчета:

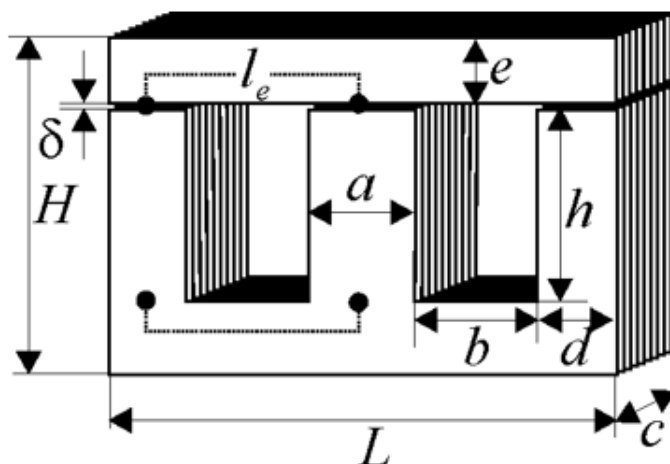


Рисунок 1: трансформатор.

Частота сети:  $f = 50$  Гц

Напряжение первичной обмотки:  $U_1 = 230$  В

Максимальная индукция в стержне:  $B_m = 1.5$  Тл

Плотность тока:  $j = 2.5 \frac{A}{mm^2}$

Коэффициент заполнения стали:  $k_{Fe} = 0.9$

Коэффициент заполнения окна:  $k_{Cu} = 0.25$

Материал сердечника: сталь Э320

Зазор в сердечнике:  $\delta = 0.05$  мм

Тип трансформатора: броневой

Обмотки: концентрические

Размеры сердечника:

№	H [мм]	L [мм]	a [мм]	b [мм]	c [мм]	h [мм]	U <sub>2</sub> [В]
2	38	44	12	8	12	22	10

## Задание 1

Вначале найдем недостающие геометрические метрики трансформатора:

- Высота яра:

$$e = \frac{H - h - \delta}{2} = 7.975 \text{ мм}$$

- Ширина стержня:

$$d = \frac{L - a - 2b}{2} = 8 \text{ мм}$$

- Средняя линия потока яра  $l_e$ :

$$l_e = 2 \cdot e + b + \frac{a}{2} + d = 37.95 \text{ мм}$$

- Площадь отверстия:

$$S_b = b \cdot h = 44 \text{ мм}^2$$

- Площадь сечения части  $a$ :

$$S_a = a \cdot c = 1.44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

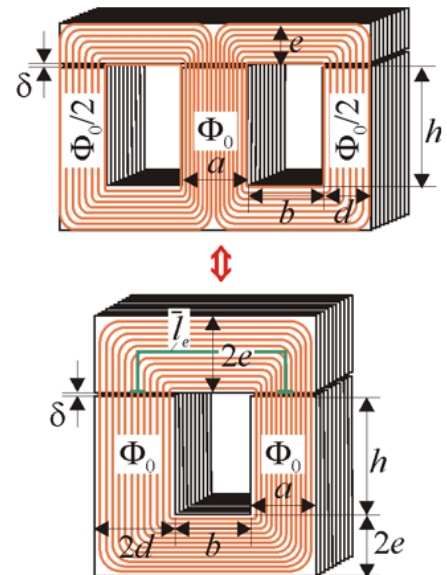


Рисунок 2. Эквивалентные схемы трансформатора.

- Площадь сечения части  $d$ :

$$S_d = 2 \cdot d \cdot c = 192 \text{ мм}^2$$

- Площадь сечения части  $e$ :

$$S_e = 2 \cdot e \cdot c = 191.4 \text{ мм}^2$$

Вычислим номинальный ток обмотки:

$$I_n = \frac{S_b \cdot k_{Cu} \cdot j}{2} = 55 \text{ A}$$

Теперь найдем максимальную индукцию в стержне  $B_{m_{cur}}$  с помощью программного цикла с выходом по условию равенства тока намагничивания 40% от номинального значения.

Индукции в частях будем рассчитывать на каждом шаге по таким формулам:

$$\text{главный стержень: } B_a = B_{m_{cur}}$$

$$\text{боковой стержень: } B_d = \frac{B_{m_{cur}} \cdot S_a \cdot k_{Fe}}{S_d \cdot k_{Fe}}$$

$$\text{ядро: } B_e = \frac{B_{m_{cur}} \cdot S_a \cdot k_{Fe}}{S_e \cdot k_{Fe}}$$

Программный код поиска индукции:

```
% find the maximum induction in the rod 'b_m_cur' using the output loop
% under the condition of equality of the no-load current to 40% of the
% nominal current value
b_m_cur = b_m;
```

```
while 1
```

```
    % calculate inductions in different parts
```

```
    b_a = b_m_cur;
```

```
    b_d = b_m_cur * s_a * k_fe / (s_d * k_fe);
```

```
    b_e = b_m_cur * s_a * k_fe / (s_e * k_fe);
```

```
    % obtain the field strength from induction in A/m
```

```
    h_a = h_b_lin_approx(b_a) * 100;
```

```
    h_d = h_b_lin_approx(b_d) * 100;
```

```
    h_e = h_b_lin_approx(b_e) * 100;
```

```
    h_oa = b_a / (sqrt(2) * 4 * pi * 10 ^ (-7)); % A/m
```

```
    h_od = b_d / (sqrt(2) * 4 * pi * 10 ^ (-7)); % A/m
```

```
    u_o = (h_oa + h_od) * delta * 10^(-3); % A
```

```
    u_a = h_a * h * 10^(-3); % A
```

```

u_d = h_d * h * 10^(-3); % A
u_e = 2 * h_e * l_e * 10^(-3); % A

i_mu = u_o + u_a + u_d + u_e; % magnetized current

k = i_mu / i_n;

if k > 0.4
    b_m_cur = b_m_cur - 0.0001; % step
else
    break
end
end

% find the dependence H(B) from the tabulated data
function h = h_b_lin_approx(b)
    b_data = [0 0.5 1 1.25 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2];
    h_data = [0 0.3 0.6 1.6 4.8 7.2 8.6 14.2 24 40];

    if b < 0
        h = 0;
        return
    end

    l_index = 0;
    for index = 1:length(b_data)
        if b > b_data(index)
            l_index = index;
        end
    end

    k = polyfit([b_data(l_index), b_data(l_index + 1)], [h_data(l_index),
h_data(l_index + 1)], 1);
    h = b .* k(1) + k(2);
end

```

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;  $H$  – напряжённость;  $p$  – удельная мощность потерь в стали;  $q$  – удельная реактивная мощность (намагничивания).

Найденные значения после работы программы:

Индукции в частях трансформатора:

$$B_a = B_{m_{cur}} = 0.4002 \text{ Тл}, \quad B_d = 0.3002 \text{ Тл}, \quad B_e = 0.3011 \text{ Тл}$$

Напряженности в частях:

$$H_a = 24.012 \frac{\text{А}}{\text{м}}, \quad H_d = 18.009 \frac{\text{А}}{\text{м}}, \quad H_e = 18.0655 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Напряженности магнитного поля в зазорах трансформатора:

$$H_{oa} = \frac{B_a}{\sqrt{2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 2.2519 \cdot 10^5 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

$$H_{od} = \frac{B_d}{\sqrt{2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 1.6889 \cdot 10^5 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Магнитные напряжения:

- В двух зазорах:

$$U_o = (H_{oa} + H_{od}) \cdot \delta = 19.7043 \text{ А}$$

- В стержне  $a$ :

$$U_a = H_a \cdot h = 0.5283 \text{ А}$$

- В стержне  $d$ :

$$U_d = H_d \cdot h = 0.3962 \text{ А}$$

- В верхнем и нижнем ярмах магнитопровода:

$$U_e = 2 \cdot H_e \cdot l_e = 1.3712 \text{ А}$$

Суммарный ток намагничивания:

$$I_\mu = U_a + U_d + U_o + U_e = 21.9999 \text{ А}$$

Отношение токов:

$$\frac{I_\mu}{I_n} = 0.4$$

При изначальном  $B_m = 1.5 \text{ Тл}$ , отношение токов было равно 1.4. Поэтому пришлось последовательно уменьшать значение  $B_{m_{cur}}$  и производить расчеты заново до тех пор, пока отношение не стало меньше 0.4.

## Задание 2

Вычислим полную мощность трансформатора:

$$S = 2.22 \cdot B_{m_{cur}} \cdot S_a \cdot k_{Cu} \cdot S_b \cdot k_{Fe} \cdot j = 0.6333 \text{ Вт}$$

Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = 23$$

Рассчитаем число витков первичной и вторичной обмоток:

$$w_1 = \frac{U_1}{4.44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_a \cdot k_{Fe}} = 5329$$
$$w_2 = \frac{w_1}{k} = 232$$

Номинальный ток первичной и вторичной обмоток:

$$I_{1n} = \frac{I_n}{w_1} = 0.0103 \text{ А}$$
$$I_{2n} = \frac{I_n}{w_2} = 0.2374 \text{ А}$$

Найдем сечение витка первичной и вторичной обмоток:

$$S_{10} = \frac{I_{1n}}{j} = 4.128 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$$
$$S_{20} = \frac{I_{2n}}{j} = 9.4945 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$$

Удельное сопротивление по площади сечения найдем программным способом, как и в первом задании:

```
% get the resistivity dependence rho(S) from the cross section of the conductor
function rho = rho_s_lin_approx(s)
    s_data = [0.00368 0.00502 0.00636 0.00785 0.00850 0.01131 0.01327 0.01539 0.01767
0.02011 0.0227 0.02545 0.02835 0.03142 0.03464 0.04155 0.04909 0.05726 0.06605
0.07548 0.08853 0.09621 0.11341 0.13202 0.15205 0.17349 0.18848 0.20428 0.22051
0.23578 0.25565 0.27340 0.30191 0.32170 0.35256 0.37393 0.40715 0.43008 0.46556
```

```

0.50265 0.54060 0.58088 0.63617 0.67920 0.72382 0.78540 0.84950 0.91610 0.98520
1.0568 1.1310 1.2272 1.3273 1.4314 1.5394 1.6513 1.7670 1.9113 2.0612 2.2167 2.3780]
.* 10.^(-6);

rho_data = [4.4 3.63 2.86 2.24 1.85 1.55 1.32 1.14 0.994 0.873 0.773 0.688 0.618
0.558 0.507 0.423 0.357 0.306 0.266 0.233 0.205 0.182 0.155 0.133 0.115 0.101 0.0931
0.0859 0.0793 0.0739 0.0687 0.0643 0.0579 0.0546 0.0497 0.0469 0.0430 0.0408 0.0376
0.0349 0.0324 0.0302 0.0275 0.0258 0.0242 0.0224 0.0206 0.0192 0.0177 0.0166 0.0155
0.0143 0.0132 0.0122 0.0114 0.0106 0.00989 0.00918 0.00850 0.00792 0.00736];

if s < 0
    rho = 0;
    return
end

l_index = 0;
for index = 1:length(s_data)
    if s > s_data(index)
        l_index = index;
    end
end

k = polyfit([s_data(l_index), s_data(l_index + 1)], [rho_data(l_index),
rho_data(l_index + 1)], 1);
rho = s .* k(1) + k(2);

end

```

Данные обмоточных проводов

Сечение [мм²]	Сопрот. [Ом/м]	Сечение [мм²]	Сопрот. [Ом/м]	Сечение [мм²]	Сопрот. [Ом/м]
0,00502	3,63	0,09621	0,182	0,58088	0,0302
0,00636	2,86	0,11341	0,155	0,63617	0,0275
0,00785	2,24	0,13202	0,133	0,67929	0,0258
0,00850	1,85	0,15205	0,115	0,72382	0,0242
0,01131	1,55	0,17349	0,101	0,78540	0,0224
0,01327	1,32	0,18848	0,0931	0,84950	0,0206
0,01539	1,14	0,20428	0,0859	0,91610	0,0192
0,01767	0,994	0,22051	0,0793	0,98520	0,0177
0,02011	0,873	0,23578	0,0739	1,0568	0,0166
0,02270	0,773	0,25565	0,0687	1,1310	0,0155
0,02545	0,688	0,27340	0,0643	1,2272	0,0143
0,02835	0,618	0,30191	0,0579	1,3273	0,0132
0,03142	0,558	0,32170	0,0546	1,4314	0,0122
0,03464	0,507	0,35256	0,0497	1,5394	0,0114
0,04155	0,423	0,37393	0,0469	1,6513	0,0106
0,04909	0,357	0,40715	0,0430	1,7670	0,00989
0,05726	0,306	0,43008	0,0408	1,9113	0,00918
0,06605	0,266	0,46556	0,0376	2,0612	0,00850
0,07548	0,233	0,50265	0,0349	2,2167	0,00792
0,08553	0,205	0,54060	0,0324	2,3780	0,00736



Получили следующие значения:

$$S_{10} = 4.128 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \rightarrow \rho_1 = 4.1425 \text{ Ом/м}$$

$$S_{20} = 9.4945 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \rightarrow \rho_2 = 0.1858 \text{ Ом/м}$$

Теперь вычислим длину одного витка:

$$L_1 = 2 \cdot (a + c + 3 \cdot b) = 0.096 \text{ м}$$

$$L_2 = 2 \cdot (a + c + b) = 0.064 \text{ м}$$

Рассчитаем сопротивление первичной и вторичной обмоток:

$$R_1 = w_1 \cdot L_1 \cdot \rho_1 = 2119.4 \text{ Ом}$$

$$R_2 = w_2 \cdot L_2 \cdot \rho_2 = 2.7552 \text{ Ом}$$

### Задание 3

Рассчитаем потери в обмотках трансформатора при номинальных токах:

$$P_{Cu} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 = 0.38096 \text{ Вт}$$

Найдем объем и массу частей трансформатора, учитывая что плотность стали

$$\gamma_{Fe} = 7800 \text{ кг/м}^3$$

$$V_a = a \cdot h \cdot c = 3.168 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$V_d = d \cdot h \cdot c = 2.112 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$V_e = e \cdot c \cdot (a + 2 \cdot b + 2 \cdot d) = 4.2108 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$G_a = V_a \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_{Fe} = 0.0222 \text{ кг}$$

$$G_d = V_d \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_{Fe} = 0.0148 \text{ кг}$$

$$G_e = V_e \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_{Fe} = 0.0296 \text{ кг}$$

Найдем соответствующие параметры  $p$  и  $q$ , используя программный код и данные из таблицы:

```
% get the specific reactive power q(b) by induction
function q = q_b_lin_approx(b)
    b_data = [0 0.5 1 1.25 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2];
    q_data = [0 0.43 1.7 5.7 20.5 32.5 41.5 73 110 180];
```

```

if b < 0
    q = 0;
    return
end

l_index = 0;
for index = 1:length(b_data)
    if b > b_data(index)
        l_index = index;
    end
end

k = polyfit([b_data(l_index), b_data(l_index + 1)], [q_data(l_index),
q_data(l_index + 1)], 1);
q = b .* k(1) + k(2);
end

% get specific power loss in steel p(b) from induction
function p = p_b_lin_approx(b)
    b_data = [0 0.5 1 1.25 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2];
    p_data = [0 0.1 0.5 0.9 1.4 1.7 2.0 2.45 3 4];

    if b < 0
        p = 0;
        return
    end

    l_index = 0;
    for index = 1:length(b_data)
        if b > b_data(index)
            l_index = index;
        end
    end

    k = polyfit([b_data(l_index), b_data(l_index + 1)], [p_data(l_index),
p_data(l_index + 1)], 1);
    p = b .* k(1) + k(2);
end

```

Полученные значения:

$$B_a = 0.3960 \text{ Тл} \rightarrow p_a = 0.0792 \frac{\text{Вт}}{\text{кГ}}, q_a = 0.3409 \frac{\text{Вар}}{\text{кГ}}$$

$$B_e = 0.2979 \text{ Тл} \rightarrow p_e = 0.0596 \frac{\text{Вт}}{\text{кГ}}, q_e = 0.2562 \frac{\text{Вар}}{\text{кГ}}$$

$$B_d = 0.2970 \text{ Тл} \rightarrow p_d = 0.0594 \frac{\text{Вт}}{\text{кГ}}, q_d = 0.2554 \frac{\text{Вар}}{\text{кГ}}$$

Вычислим теперь активные и реактивные потери в сердечнике трансформатора:

$$P_{Fe} = G_a \cdot p_a + 2 \cdot G_e \cdot p_e + 2 \cdot G_d \cdot p_d = 0.0070 \text{ Вт}$$

$$Q_{Fe} = G_a \cdot q_a + 2 \cdot G_e \cdot q_e + 2 \cdot G_d \cdot q_d = 0.0303 \text{ Вт}$$

$$I_o = \frac{I_{mu}}{w_1} = 0.0041 \text{ А}$$

$$P = R_1 \cdot I_o^2 + P_{Fe} = 0.04316 \text{ Вт}$$

Теперь можем найти коэффициент мощности в режиме холостого хода:

$$\cos\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{Fe}}{P}\right)^2}} = 0.8161$$

Рассчитаем оптимальный коэффициент нагрузки:

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{Q_{Fe}}} = 0.4822$$

Номинальный КПД:

$$\eta_N = \frac{U_1 \cdot I_{1n}}{U_1 \cdot I_{1n} + P_{Fe} + P_{Cu}} = 0.8595$$

Максимальный КПД:

$$\eta_{max} = \frac{\beta_{max} \cdot U_1 \cdot I_{1n}}{\beta_{max} \cdot U_1 \cdot I_{1n} + P_{Fe} + \beta_{max}^2 \cdot P_{Cu}} = 0.9228$$

## Выводы

В этой расчетной работе были изучены основные характеристики трансформаторов и произведены расчеты множества значений, определяющих их работу.