

## Задание №1

для выполнения первого раздела курсовой работы по дисциплине  
«Электрические машины»

Наименование раздела: **РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Задания для выполнения

Трехфазный двухобмоточный трансформатор характеризуют следующие величины:

- полная мощность  $S$ , кВ·А;
- высшее линейное напряжение  $U_{в.л.}$ , кВ;
- низшее линейное напряжение  $U_{н.л.}$ , кВ;
- мощность потерь холостого хода  $P_0$ , кВт;
- мощность потерь короткого замыкания  $P_k$ , кВт;
- напряжение короткого замыкания  $u_k$ , %;
- ток холостого хода  $i_0$ , %;
- коэффициент полезного действия трансформатора  $\eta$ , определенный:
  - для **четных вариантов** при коэффициенте нагрузки  $\beta = 1$  и коэффициенте мощности нагрузки  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (кроме вариантов с 61 по 70),
  - для **нечетных вариантов** при коэффициенте нагрузки  $\beta = 0,9$  и коэффициенте мощности нагрузки  $\cos \varphi_2 = 0,85$  (кроме вариантов с 61 по 70);
- параметры упрощенной схемы  $r_k$  и  $x_k$ , Ом;
- параметры намагничивающей ветви  $r_m$  и  $x_m$ , Ом.

Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора:

для **четных вариантов** – Y/Y

для **нечетных вариантов** – Y/Δ.

Числовые значения заданных величин и номера пунктов задания, подлежащих выполнению, указаны в табл. 1–10.

Необходимо сформулировать условие задачи для своего варианта и выполнить следующее:

- 1) начертить схему соединения обмоток трехфазного трансформатора;
- 2) определить номинальные токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора;
- 3) вычислить коэффициент трансформации фазных и линейных напряжений;
- 4) рассчитать мощность потерь холостого хода  $P_0$ ;

- 5) рассчитать мощность потерь короткого замыкания  $P_K$ ;
- 6) определить параметры упрощенной схемы замещения трансформатора, активное и реактивное сопротивления фазы первичной и вторичной обмоток, полагая, что  $r_1 = r'_2 = r_K/2$  и  $x_1 = x'_2 = x_K/2$ ;
- 7) начертить упрощенную схему замещения трансформатора;
- 8) построить Т-образную схему замещения трансформатора и определить ее параметры;
- 9) изобразить векторную диаграмму для упрощенной схемы замещения при значении коэффициента нагрузки  $\beta = 0,75$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 > 0$ ). Из векторной диаграммы необходимо определить напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_1$ , угол сдвига фаз  $\varphi_1$  между напряжением  $U_1$  и током  $I_{1н}$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$ ;
- 10) начертить векторную диаграмму для упрощенной схемы замещения при  $\beta = 1$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 < 0$ ). Из векторной диаграммы необходимо определить напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_1$ , угол сдвига фаз  $\varphi_1$  между напряжением  $U_1$  и током  $I_{1н}$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$ ;
- 11) вычислить значения процентного изменения вторичного напряжения  $\Delta u_2$  при коэффициенте нагрузки  $\beta = 1$  и значениях  $\varphi_2$ :  $-90^\circ$ ;  $-60^\circ$ ;  $-30^\circ$ ;  $0^\circ$ ;  $30^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $90^\circ$ . Построить график зависимости  $\Delta u_2 = f(\varphi_2)$ ;
- 12) найти процентное изменение вторичного напряжения  $\Delta u_2$  и напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки при  $\beta = 0,25$ ;  $0,50$ ;  $0,75$ ;  $1,0$  и значениях  $\varphi_2$ , указанном в табл. 5. Построить график внешней характеристики;
- 13) рассчитать процентное изменение вторичного напряжения  $\Delta u_2$  при значениях коэффициента нагрузки  $\beta = 0,25$ ;  $0,50$ ;  $0,75$ ;  $1,0$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$ );
- 14) для заданного значения коэффициента мощности определить максимальное значение КПД трансформатора;
- 15) найти КПД трансформатора при значениях коэффициента нагрузки  $\beta = 0,25$ ;  $0,50$ ;  $0,75$ ;  $1,0$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$ ;
- 16) построить графики семейства внешней характеристики  $U_2 = f(\beta)$  трансформатора при значениях коэффициента мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 0,5$ ;  $0,8$  (при  $\varphi_2 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$ ). При каждом значении  $\varphi_2$  напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки определить для значений  $\beta = 0,25$ ;  $0,50$ ;  $0,75$ ;  $1,0$ ;
- 17) начертить в общей системе координатных осей графики зависимостей напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки и коэффициента полезного действия  $\eta$  от коэффициента нагрузки  $\beta$ . Вычисления произвести для  $\beta = 0,25$ ;

0,50; 0,75; 1,0 при  $\cos\varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$ );

18) вычислить значения напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки и коэффициента полезного действия  $\eta$  для различных значений коэффициента нагрузки  $\beta$ . Расчеты произвести для  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 > 0$ ). Построить графики зависимостей  $U_2 = f(\beta)$  и  $\eta = f(\beta)$ ;

19) определить характер нагрузки ( $\varphi_2 = ?$ ), при котором напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки не зависит от коэффициента нагрузки  $\beta$ , и для этого случая построить график зависимости  $\eta = f(\beta)$  при изменении  $\beta$  от 0 до 1 через 0,25;

20) построить в общей системе координатных осей график зависимости  $U_2 = f(I_2)$  при  $\cos\varphi_2 = 0,8$  для  $\varphi_2 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$ , а также  $\eta = f(I_2)$  при  $\cos\varphi_2 = 0,8$ ;

21) рассчитать значение КПД  $\eta$  трансформатора при значениях коэффициента нагрузки  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$  и построить график зависимости  $\eta = f(\beta)$ ;

22) определить характер нагрузки ( $\varphi_2 = ?$ ), при котором напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки не зависит от коэффициента нагрузки  $\beta$ ;

23) найти напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки и КПД  $\eta$  трансформатора при значениях коэффициента нагрузки  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 < 0$ ). Построить в общей системе координатных осей графики зависимостей  $U_2 = f(\beta)$  и  $\eta = f(\beta)$ .

Таблица 1

Исходные данные для вариантов 01–10

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 7, 9, 13, 14, 15, 20							
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$P_0$ , кВт	$P_K$ , кВт	$u_K$ , %	$i_0$ , %
01	25	6,3	0,4	0,105	0,600	4,5	3,2
02	40	6,3	0,23	0,240	0,880	4,5	4,5
03	40	10,0	0,4	0,160	0,940	4,6	3,0
04	63	6,3	0,4	0,360	1,350	4,7	4,5
05	100	6,3	0,4	0,330	2,100	4,6	2,6
06	100	35,0	0,4	0,430	2,100	6,6	4,2
07	160	35,0	0,4	0,610	2,800	6,6	2,4
08	250	10,0	0,4	1,050	3,900	4,6	3,0
09	250	35,0	0,4	0,960	3,900	6,6	2,3
10	320	10,0	0,525	1,350	4,650	4,5	5,5

Таблица 2

Исходные данные для вариантов 11–20

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 7, 6, 10, 11, 14, 21							
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$P_0$ , кВт	$P_K$ , кВт	$u_K$ , %	$i_0$ , %
11	1000	10	0,4	2,45	12,2	5,5	1,4
12	1600	10	0,4	3,30	18,0	5,5	1,3
13	1000	35	0,4	2,75	12,2	6,5	1,5
14	1600	35	0,4	3,65	18,0	6,5	1,4
15	2500	10	0,4	4,60	25,0	5,5	1,0
16	2500	35	0,4	5,10	25,0	6,5	1,1
17	1000	10	0,23	2,45	12,8	5,5	1,4
18	1600	10	0,23	3,30	18,9	5,5	1,3
19	1000	35	0,23	2,75	12,8	6,5	1,5
20	1600	35	0,23	3,65	18,9	6,5	1,4

Таблица 3

Исходные данные для вариантов 21–30

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 8, 10, 14, 19							
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$P_0$ , кВт	$P_K$ , кВт	$u_K$ , %	$i_0$ , %
21	160	35,0	0,4	0,610	2,800	6,6	2,4
22	100	6,3	0,4	0,330	2,100	4,6	2,6
23	63	6,3	0,4	0,360	1,350	4,7	4,5
24	10	6,0	0,4	0,105	0,335	5,5	10,0
25	20	10,0	0,4	0,220	0,600	5,5	10,0
26	30	6,3	0,4	0,250	0,850	5,5	8,0
27	50	6,3	0,525	0,350	1,325	5,5	7,0
28	180	35,0	10,5	1,500	4,100	6,5	8,0
29	100	10,0	0,525	0,730	2,400	5,5	7,5
30	180	6,3	0,525	1,000	4,000	5,5	6,0



Таблица 4

Исходные данные для вариантов 31–40

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 18						
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$P_0$ , кВт	$r_k$ , Ом	$x_k$ , Ом
31	25	6,3	0,4	0,105	38,14	60,41
32	40	10	0,4	0,160	59,23	98,57
33	100	35	0,23	0,465	253,4	755,6
34	160	10	0,23	0,565	10,84	25,92
35	250	10	0,23	0,820	6,20	16,90
36	250	35	0,23	1,000	75,9	301,2
37	25	10	0,4	0,135	95,12	152,8
38	160	35	0,4	0,610	133,9	487,7
39	100	6,3	0,4	0,330	8,30	16,25
40	63	6,3	0,4	0,360	13,47	26,36

Таблица 5

Исходные данные для вариантов 41–50

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 5, 8, 9, 12, 14, 21								
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$P_0$ , кВт	$\eta$ , %	$u_k$ , %	$i_0$ , %	$\varphi$ , град.
41	25	6,3	0,4	0,105	96,6	4,5	3,2	0
42	25	6,3	0,23	0,105	96,5	4,5	3,2	-90
43	40	6,6	0,23	0,240	96,6	4,5	4,5	-60
44	40	10,0	0,4	0,160	96,7	4,6	3,0	-30
45	25	10,0	0,4	0,135	96,5	4,5	3,2	30
46	100	35,0	0,4	0,465	97,0	6,5	2,6	60
47	100	35,0	0,23	0,465	96,9	6,5	2,6	90
48	160	10,0	0,23	0,565	97,5	4,5	2,4	-45
49	250	10,0	0,23	0,820	97,7	4,5	2,3	45
50	250	35,0	0,23	1,000	97,6	6,5	2,3	-15

Таблица 6

Исходные данные для вариантов 51–60

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 5, 8, 10, 14, 21, 22							
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$P_0$ , кВт	$x_k$ , Ом	$u_k$ , %	$i_0$ , %
51	25	6,3	0,23	0,105	59,16	4,5	3,2
52	40	10	0,4	0,160	98,57	4,6	3,0
53	100	35	0,4	0,465	759,0	6,5	2,6
54	160	10	0,23	0,565	25,92	4,5	2,4
55	250	35	0,23	1,000	309,0	6,5	2,3
56	1600	10	0,4	3,300	3,37	5,5	1,3
57	2500	10	0,4	4,600	2,16	5,5	1,0
58	1000	10	0,23	2,450	5,35	5,5	1,4
59	160	35	0,4	0,610	488,0	6,6	2,4
60	63	6,3	0,4	0,360	26,36	4,7	4,5

Таблица 7

Исходные данные для вариантов 61–70

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 4, 7, 6, 9, 14, 21							
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$\eta^*$ , %	$P_K$ , кВт	$u_K$ , %	$i_0$ , %
61	250	35	0,23	98,1	3,885	6,5	2,3
62	250	10	0,23	98,2	3,885	4,5	2,3
63	160	10	0,23	98,1	2,783	4,5	2,4
64	1600	10	0,23	98,8	18,9	5,5	1,3
65	100	35	0,4	97,7	1,970	6,5	2,6
66	63	6,3	0,4	97,3	1,350	4,7	4,5
67	160	35	0,4	98,0	2,800	6,6	2,4
68	1000	35	0,23	98,5	12,80	6,5	1,5
69	40	6,3	0,23	97,2	0,880	4,5	4,5
70	25	6,3	0,4	97,5	0,600	4,5	3,2

\* КПД определен при коэффициенте нагрузки  $\beta = 0,7$  и коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2 = 0,8$ 

Таблица 8

Исходные данные для вариантов 71–80

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 14, 17							
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$r_K$ , Ом	$x_K$ , Ом	$r_M$ , Ом	$x_M$ , Ом
71	180	10	0,525	12,64	27,84	755	7904
72	100	10	0,525	23,95	49,51	1295	13271
73	100	6,3	0,525	9,5	19,65	562	5918
74	20	6,3	0,4	59,4	91,57	2200	21940
75	10	10	0,4	334,2	436,78	13969	99026
76	63	6,3	0,4	13,47	26,36	1775	13893
77	100	6,3	0,4	8,3	16,25	1931	15134
78	160	35	0,4	133,9	487,7	50650	315263
79	50	6,3	0,525	20,98	38,28	1131	11282
80	30	6,3	0,4	37,38	62,41	1718	16446

Таблица 9

Исходные данные для вариантов 81–90

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 5, 4, 7, 9, 14, 16, 21							
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$\eta$ , %	$r_K$ , Ом	$u_K$ , %	$i_0$ , %
81	1600	35	0,23	98,2	9,03	6,5	1,4
82	1000	10	0,23	98,1	1,28	5,5	1,4
83	2500	35	0,4	98,5	4,89	6,5	1,1
84	1600	10	0,4	98,3	0,70	5,5	1,3
85	250	10	0,23	97,7	6,20	4,5	2,3
86	25	6,3	0,4	96,5	38,14	4,5	3,2
87	40	6,3	0,23	96,6	21,78	4,5	4,5
88	25	10	0,4	96,4	95,12	4,5	3,2
89	100	35	0,23	96,9	253,4	6,5	2,6
90	165	35	0,4	97,4	133,9	6,6	2,4

Т а б л и ц а 10

Исходные данные для вариантов 91–100

Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 3, 5, 4, 8, 10, 14, 23							
Вариант	$S$ , кВ·А	$U_{в.н.}$ , кВ	$U_{н.н.}$ , кВ	$\eta$ , %	$x_k$ , Ом	$u_{к.а.}$ , %	$i_0$ , %
91	180	35	10,5	96,3	414,4	2,3	8
92	100	35	0,525	96,0	740,1	2,4	8
93	50	10	0,4	95,8	96,46	2,6	8
94	30	6,3	0,4	95,6	62,41	2,8	8
95	20	10	0,4	95,1	230,7	3,0	10
96	10	6,0	0,4	94,8	157,3	3,3	10
97	180	6,3	0,525	96,6	11,10	2,2	6
98	100	10	0,525	96,2	49,51	2,4	7,5
99	50	6,3	0,525	96,0	38,28	2,6	7
100	30	10	0,4	95,4	157,5	2,8	9

## 1.2. Методические указания

Коэффициенты трансформации линейных и фазных напряжений трансформатора могут быть найдены как отношение соответствующих напряжений:

$$k_{л} \approx \frac{U_{в.н.}}{U_{н.н.}}; \quad k_{ф} \approx \frac{U_{1ф}}{U_{2ф}}, \quad (1)$$

где  $U_{1ф}$  и  $U_{2ф}$  – фазные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений.

Расчет параметров трехфазного трансформатора ведется по фазным токам и напряжениям, в формулах данные параметры имеют индекс «н» – номинальные. Для этого необходимо исходные данные в зависимости от схемы соединения обмоток перевести в фазные (номинальные) величины.

Важнейшими параметрами трансформатора являются напряжение короткого замыкания  $u_k$ , %, и ток холостого хода  $i_0$ , %:

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1н}} 100, \quad i_0 = \frac{I_{10}}{I_{1н}} 100, \quad (2)$$

где  $U_k$  – напряжение, измеренное в опыте к. з., В;

$U_{н}$  – номинальное напряжение первичной обмотки, В;

$I_{10}$  – ток, измеренный в опыте х. х., А;

$I_{1н}$  – номинальный ток первичной обмотки, А.

Сопровителения намагничивающей цепи схемы замещения (рис. 1) могут быть определены по параметрам холостого хода:

$$r_m = \frac{P_0}{I_{10}^2}; \quad z_m = \frac{U_{1н}}{I_{10}}; \quad x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}. \quad (3)$$

Коэффициент мощности при х. х.

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1H} I_{10}}. \quad (4)$$

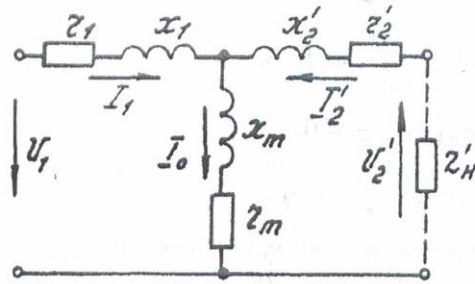


Рис. 1

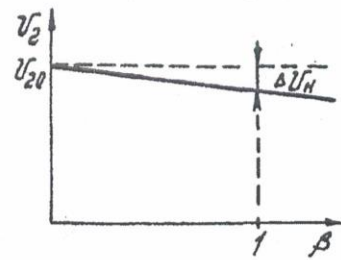


Рис. 2

Для трехфазных трансформаторов величину потерь х. х.  $P_0$  и потерь к. з.  $P_K$  (указанные в исходных данных, либо рассчитанные через КПД с учетом полной мощности трехфазного трансформатора) следует уменьшить в три раза, т. е. определить величину потерь на одну фазу.

Сопротивления к. з.:

$$r_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2}; \quad z_K = \frac{U_K}{I_{1H}}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (5)$$

Коэффициент мощности при к. з.

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_K I_{1H}}. \quad (6)$$

Сопротивления рабочих ветвей схемы замещения с достаточной степенью точности можно принять:

$$r_1 = r_2' = \frac{r_K}{2}; \quad x_1 = x_2' = \frac{x_K}{2}. \quad (7)$$

Составляющие напряжения к. з., %:

$$u_K = \frac{I_{1H} z_K}{U_{1H}} 100; \quad u_{K.p} = \frac{I_{1H} x_K}{U_{1H}} 100; \quad u_{K.a} = \frac{I_{1H} r_K}{U_{1H}} 100. \quad (8)$$

Процентное изменение вторичного напряжения при работе трансформатора под нагрузкой, %,

$$\Delta u_2 = \beta (u_{K.a} \cos \varphi_2 + u_{K.p} \sin \varphi_2), \quad (9)$$

где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{P_2}{P_{2H}}$  — коэффициент нагрузки.

Внешняя характеристика трансформатора (рис. 2) описывается уравнением:

$$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta u_2}{100}\right). \quad (10)$$



В данном случае  $U_{20} = U_{2н} (1 + \frac{\Delta u_{2н}}{100})$  - напряжение на вторичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода,

где  $\Delta u_{2н}$  - процентное изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора при номинальной нагрузке, которое рассчитывается при следующих (номинальных) условиях -  $\beta = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 > 0$ ).

Коэффициент полезного действия трансформатора можно определить по выражению, %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \left( 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \right) 100, \quad (11)$$

где  $\sum P$  - суммарные потери, Вт,

$$\sum P = P_c + P_m,$$

где  $P_c$  - потери в стали, Вт,

$$P_c = P_0 - I_{10}^2 r_1.$$

(В ряде случаев для трансформаторов большой и средней мощности без большой погрешности можно принять  $P_c \cong P_0$ );

$P_m$  - потери в обмотках (в меди), Вт,

$$P_m = \beta^2 P_k;$$

$P_2$  - мощность, отдаваемая трансформатором, Вт,

$$P_2 = \beta S \cos \varphi_2.$$

КПД трансформатора достигает максимума при равенстве потерь в стали (постоянных) и потерь в меди (переменных).

Коэффициент нагрузки при максимальном КПД:

$$\beta_m = \sqrt{P_c / P_k}. \quad (12)$$

Значение максимального КПД можно найти по формуле (11), подставив соответствующее значение  $\beta_m$ .