

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Е.В. КАЧАЛИНА
С.А. КОРОБКОВ

**РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ, ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО
ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Методические указания

Для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика и электротехника»

Москва

Издательство МЭИ

2017

УДК 621.314
ББК 31.261.8
К309

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре электромеханики, электрических и
электронных аппаратов НИУ «МЭИ»

Рецензент: доктор технических наук, проф. каф. ЭМЭЭА НИУ
«МЭИ» Беспалов В.Я.

**РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ, ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА
И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ. Методические
указания./ Качалина Е.В., Коробков С.А. - М.: Издательский дом МЭИ ,
2017. -19 с.**

Методические указания содержат задание на выполнение расчета параметров холостого хода и короткого замыкания современных силовых трансформаторов, а также рекомендации по выполнению отдельных пунктов задания и рекомендуемую литературу.

Указания предназначены для подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**УДК 621.314
ББК 31.261.8**

© Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
2017 г.

Содержание расчетного задания соответствует программам курсов «Электрические машины» и «Электромеханика», читаемых кафедрой для институтов электротехники и электроэнергетики НИУ МЭИ.

Число и характер пунктов расчетного задания, необходимый объем расчетной работы выбраны так, чтобы тематика задания охватывала наиболее важные вопросы теории трансформаторов и общий объем работы был существенно большим, чем это предусмотрено графиком обязательных заданий. Это позволяет преподавателю составлять задание для каждой группы или для каждого студента с использованием части пунктов расчетного задания в соответствии с профилем института и специальности, а также с объемом, установленным графиком.

Для каждого студента обязательно выполнение тех пунктов расчетного задания, которые будут указаны лектором потока или преподавателем, ведущим занятия.

Основными учебными пособиями являются учебники [1—3]. При выполнении расчетов можно пользоваться книгой [4].

Расчетное задание по трансформаторам и автотрансформаторам

Для трехфазного двухобмоточного трансформатора №... из табл. 1 или 2, принимая первичной обмоткой обмотку ВН:

1. Определить фазные значения номинального напряжения, а также номинальный ток и его фазные значения на сторонах ВН и НН, и коэффициент трансформации (для средней ступени напряжения ВН).

2. Вычертить в масштабе эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток. Вычертить схемы соединения обмоток, обеспечивающие получение заданной группы соединения.

3. Определить:

а) массы стали стержней и ярм, потери холостого хода P_x , среднее (среднее арифметическое для трех фаз) значение тока холостого хода i_0 и его активной i_{0a} и реактивной i_{0p} составляющих, а также $\cos\varphi_0$ — все величины для номинального значения напряжения $U_{ном}$ при $f = 50$ Гц;

б) приведенные к первичной обмотке параметры схемы замещения r_0 , x_0 и z_0 в Омах при $U = U_{ном}$;

в) рассчитать и построить характеристики холостого хода: $P_x = f(U)$; $I_0 = f(U)$ и $\cos\varphi_0 = f(U)$, а также графики $I_{0a} = f(U)$ и $I_{0p} = f(U)$ для диапазона значений U от 50 до 110% от $U_{ном}$;

г) потери холостого хода трансформатора при включении в сеть с частотой 40 и 60 Гц.

4. Определить:

а) потери короткого замыкания P_k ;

б) приведенные к первичной обмотке составляющие сопротивления короткого замыкания r_k, x_k, z_k в Омах; составляющие напряжения короткого замыкания u_a и u_p , напряжение короткого замыкания u_k в процентах и $\cos\varphi_k$;

в) рассчитать и построить график изменения вторичного напряжения трансформатора $\Delta U = f(\cos\varphi_2)$ при номинальном токе. Определить $\cos\varphi_2$, при котором ΔU принимает максимальное значение. Построить на одной диаграмме внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$ и график $\Delta U = f(I_2)$ при $\cos\varphi_2 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,7$.

5. Построить в масштабе приведенную векторную диаграмму:

а) для одной фазы трансформатора при нагрузке номинальным током и $\cos\varphi_2 = 0,8$;

б) то же при емкостной нагрузке $\cos(-\varphi_2) = 0,0$.

6. Рассчитать

а) и построить зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(P_2)$ при $\cos\varphi_2 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,7$. Определить P_2 , при котором η приобретает максимальное значение;

б) среднесуточный КПД для графика нагрузки №... из табл. 3 при $\cos\varphi_2 = 0,9$.

7. Для трехобмоточного трансформатора №... из табл. 4:

а) рассчитать фазные напряжения, линейные и фазные токи обмоток;

б) найти параметры схемы замещения $x_1, x_2, x_3, r_1, r_2, r_3, z_1, z_2, z_3$, приведенные к обмотке ВН;

в) найти напряжения на зажимах вторичных обмоток СН и НН при первичной обмотке ВН, обмотке СН, нагруженной номинальным током при $\cos\varphi_2 = 0,8$ и разомкнутой обмотке НН;

г) построить приведенную векторную диаграмму для одной фазы трансформатора при нагрузке обеих вторичных обмоток СН и НН номинальными токами при $\cos\varphi_2 = 0,9$ и $\cos\varphi_3 = 0,6$.

8. Для трехфазного автотрансформатора №... из табл. 5 определить:

а) фазные напряжения, линейные и фазные номинальные токи обмоток ВН и НН;

б) электромагнитную (расчетную) мощность автотрансформатора и отношение этой мощности к проходной;

в) установившийся ток короткого замыкания для обмоток ВН и НН;

г) коэффициент полезного действия при работе обмоток ВН и НН при $\beta = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Графики суточной нагрузки трансформаторов (от номинальной мощности трансформатора, %)

№ П/П	Часы суток											
	0—2	2—4	4—6	6—8	8—10	10—12	12—14	14—16	16—18	18—20	20—22	22—24
1	10	10	10	10	100	100	50	100	100	10	10	10
2	20	20	20	100	100	100	100	70	100	100	100	20
3	60	60	60	100	100	100	80	100	100	100	100	60
4	20	20	20	40	40	10	10	10	100	100	70	50
5	10	10	10	30	50	50	30	60	100	100	70	70
6	40	20	20	100	100	80	80	100	100	100	80	60
7	30	30	50	50	50	40	40	50	100	100	80	50

Таблица 4

Основные данные силовых трехфазных трехобмоточных трансформаторов с масляным охлаждением

№ П/П	Основные данные				Характеристики							
	Мощность, кВ·А	Напряжения обмоток, кВ			Короткого замыкания						Холостого хода	
		S	U ₁	U ₂	U ₃	потери, кВт			напряжения, %			потери, кВт
	P _{к,12}					P _{к,13}	P _{к,23}	u _{к,12}	u _{к,13}	u _{к,23}	P _х	
1	6300	115	38,5	11,0	52	50	46	10,5	17,0	6,0	12,5	1,10
2	10000	115	38,5	11,0	76	75	60	10,5	17,5	6,5	17,0	1,10
3	16000	115	38,5	11,0	100	105	90	10,5	17,5	6,5	21,0	0,80
4	25000	115	38,5	11,0	140	130	120	10,5	17,5	6,5	28,5	0,70
5	40000	115	38,5	11,0	200	220	150	10,5	17,5	6,5	39,0	0,60
6	63000	115	38,5	6,6	290	280	260	10,5	18,0	7,0	53,0	0,55
7	80000	115	38,5	6,6	365	380	320	11,0	18,5	7,0	64,0	0,50
8	16000	158	38,5	6,6	96	100	90	10,5	18,0	6,0	21,0	1,0
9	25000	158	38,5	11,0	145	140	120	10,5	18,0	6,0	29,0	0,9
10	32000	158	38,5	11,0	185	180	165	10,5	18,0	6,0	44,0	0,8
11	63000	158	38,5	11,0	285	240	220	10,5	18,0	6,0	56,0	0,7
12	25000	230	38,5	6,6	130	135	105	12,5	20,0	6,5	45,0	0,9
13	40000	230	38,5	11,0	220	200	170	12,5	22,0	9,5	54,0	0,55
14	63000	230	38,5	11,0	320	300	280	12,5	24,0	10,5	75,0	1,0

Примечания:

1. Схемы и группы соединений всех трансформаторов таблицы Y_н/Y_н/Д—О—11—11.
2. Номинальные мощности обмоток ВН, СН и НН всех трансформаторов относятся как 100: 100:100.

Таблица 5

**Основные данные силовых трехфазных
автотрансформаторов для высоковольтных сетей**

№ П/П	Проходная мощность, кВ·А	Напряжения обмоток, кВ		u_k ВН— НН, %	Потери кз P_k , кВт	Потери хх P_x , кВт
		ВН	НН			
1	63000	230	121	11,0	200	37
2	125000	230	121	11,0	315	65
3	200000	230	121	11,0	430	105
4	250000	230	121	11,0	500	120
5	125000	330	115	10,0	345	100
6	200000	330	115	10,5	560	155
7	250000	330	158	10,5	620	160
8	400000	330	158	10,0	720	180
9	250000	500	121	13,0	690	200
10	500000	500	230	12,0	1050	220

Примечания:

1. Потери и напряжения короткого замыкания отнесены к проходной мощности.
2. Напряжения короткого замыкания отнесены к большему из напряжений сети.

9. Заданный трансформатор включается на параллельную работу с трансформатором, имеющим те же номинальные мощность и напряжения, группу и схему соединения и другие параметры, а напряжение короткого замыкания на 10% выше, чем у заданного трансформатора:

а) найти распределение общего тока нагрузки между трансформаторами при изменении общей нагрузки от 0 до $S'_{\text{ном}} + S''_{\text{ном}}$, где $S'_{\text{ном}}$ и $S''_{\text{ном}}$ - номинальные мощности трансформаторов;

б) определить максимальную допустимую мощность установки при условии, что ни один из трансформаторов не должен перегружаться сверх своей номинальной мощности;

в) найти распределение общего тока нагрузки и уравнительный ток между: двумя трансформаторами при нагрузке $S' = S'_{\text{ном}} + S''_{\text{ном}}$ в том случае, если заданный трансформатор ошибочно включен в сеть на обмотке ВН на верхнюю ступень, т.е. на ответвление, соответствующее 105% от номинального напряжения, а второй трансформатор включен на среднюю ступень, т.е. на номинальное напряжение. Определить максимально допустимую мощность установки.

10. Определить наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания (ударный ток) и кратность этого тока по отношению к номинальному току при трехфазном коротком замыкании.

11. а) Найти токи в фазах первичной обмотки и смещение нулевой точки при токах $I_a = I_{\text{ном}}$; $I_b = I_c = 0$ (этот пункт выполняется для

трансформаторов № 1—5, 7, 8, 11, 12, 15, 18— 25, 28, 31 из табл. 1 и № 33—45 из табл. 2.

б) При симметричной системе первичных напряжений трансформатор нагружен только между зажимами a и b то-ком $I_{\text{ном}}$, сдвинутым относительно напряжения U_{ab} на угол $\varphi_0=30^\circ$. Найти токи в первичной обмотке (без учета намаг-ничивающего тока).

Построить треугольник вторичных приведенных напряжений и определить его сдвиг относительно первичного треугольника. Этот пункт выполняется для трансформаторов № 6, 9, 10, 13, 14, 16, 17, 26, 27, 29, 30, 32 из табл. 1, № 46—50 из табл. 2.

Методические указания к расчетному заданию по трансформаторам и автотрансформаторам

Перед выполнением расчетного задания рекомендуется просмотреть соответствующие разделы конспекта лекций и ознакомиться с литературой, указанной в методических указаниях. Во время выполнения задания при использовании справочных таблиц следует внимательно прочитать заголовки и все примечания к таблицам.

К пункту 1. При определении линейных и фазных значений напряжений и токов обмоток ВН и НН следует учесть схемы соединения обмоток, приведенные в табл.1 и 2. В числителе указана схема соединения обмотки ВН, в знаменателе - обмотки НН. Все трансформаторы, данные которых приведены в табл. 1 и 2, - трехфазные.

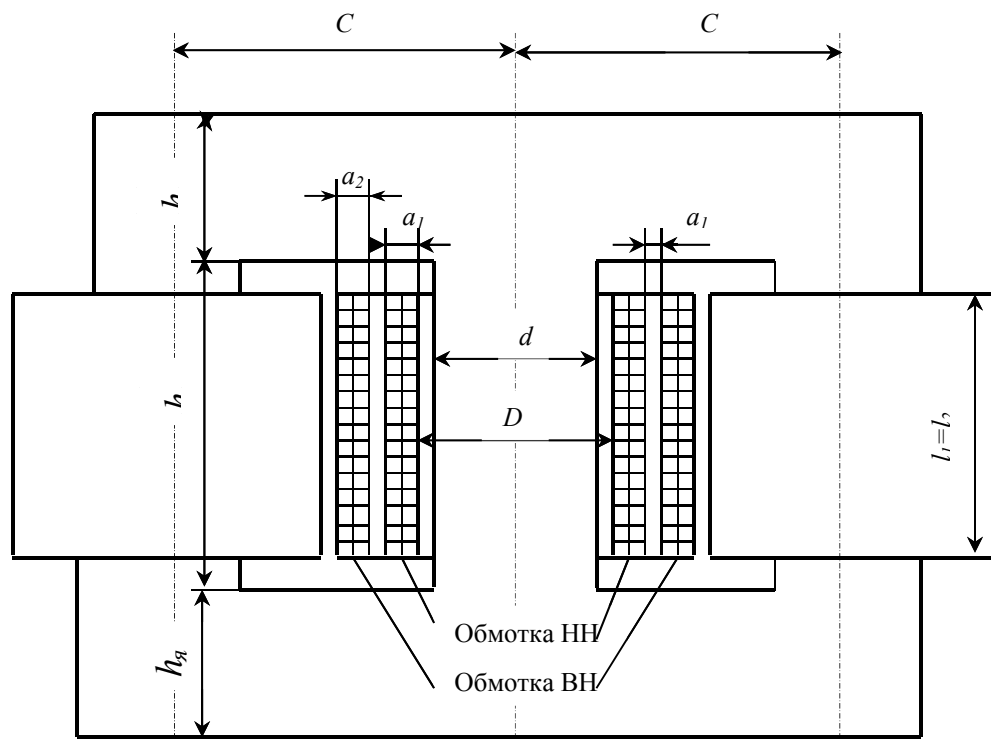


Рис. 1. Эскиз размещения обмоток.

К пункту 2. Эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток следует выполнить в масштабе в таком виде, как это показано на рис.1 с простановкой вместо буквенных обозначений заданных размеров трансформатора. Масштаб рекомендуется выбирать таким, чтобы горизонтальный размер рисунка составлял 150-200 мм при размере листа бумаги формата А4. Отдельно следует показать схемы соединения обмоток ВН и НН, обеспечивающие получение заданной группы соединения обмоток трансформатора, а также топографическую диаграмму, подтверждающую соответствие полученной группы заданию [1], § 2.4; [2], § 2.8; [3], § 1.5.

К пункту 3. а) Рассчитать массу стали в трех стержнях и двух ярмах трехфазной магнитной системы, используя ее размеры из табл. 1 или 2 и принимая плотность холоднокатаной стали $\gamma_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3$. Определить расчетную магнитную индукцию в стержнях B_c и в ярмах $B_{я}$ отдельно, принимая ЭДС первичной обмотки, равной номинальному первичному напряжению (ВН). На практике принято рассчитывать потери холостого хода трансформатора, определяя их как произведение удельных потерь в единице массы, Вт/кг, зависящих от расчетной частоты и индукции и качества стали, на массу стали соответствующей части магнитной системы. Потери рассчитываются отдельно для стержней и ярм и затем суммируются.

Добавочные потери, возникающие в магнитных системах из холоднокатаной текстурованной анизотропной стали вследствие несовпадения направления вектора магнитной индукции с направлением прокатки стали, неравномерного распределения индукции в стержнях и ярмах, а также вызванные механическими воздействиями в процессе заготовки пластин стали и сборки остова трансформатора, могут быть учтены постоянным коэффициентом $K_{п}$.

Потери холостого хода

$$P_x = K_{п} (p_c G_c + p_{я} G_{я}),$$

где p_c и $p_{я}$ — удельные потери в стали стержней и ярм, определенные по табл. 6 для соответствующих индукций в стержне B_c и в ярме $B_{я}$, Вт/кг; G_c и $G_{я}$ — массы стали стержней и ярм, кг.

Для плоской шихтованной магнитной системы трансформаторов мощностью 1000 кВ·А и более с многоступенчатым сечением стержня и ярма, с косыми стыками в четырех углах и прямыми стыками в двух углах, собранной из отожженных пластин холоднокатаной стали марок 3404 и 3405 с толщиной пластин 0,30 и 0,35 мм (рис. 2, а) коэффициент $K_{п} = 1,40$.

Для трансформаторов мощностью 63 — 630 кВ·А при прямых стыках в шести углах магнитной системы (рис. 2,б) $K_{п} = 1,8$.

Таблица 6

Удельные потери p , и удельная намагничивающая мощность q , для холоднокатаной электротехнической стали марок 3404 и 3405 толщиной 0,35 мм

Индукция B , Тл	Удельные потери p , Вт/кг		Намагничивающая мощность q , В·А/кг	
	3404	3405	3404	3405
1,00	0,475	0,450	0,548	0,533
1,20	0,675	0,635	0,752	0,732
1,30	0,785	0,755	0,900	0,860
1,40	0,930	0,875	1,060	1,020
1,50	1,100	1,030	1,330	1,246
1,52	1,134	1,070	1,408	1,311
1,54	1,168	1,110	1,486	1,376
1,56	1,207	1,150	1,575	1,447
1,58	1,251	1,190	1,675	1,524
1,60	1,295	1,230	1,775	1,602
1,62	1,353	1,278	1,956	1,748
1,64	1,411	1,326	2,131	1,894
1,66	1,472	1,380	2,556	2,123
1,68	1,536	1,440	3,028	2,435
1,70	1,600	1,500	3,400	2,747
1,72	1,672	1,560	4,480	3,547
1,74	1,744	1,620	5,560	4,347

Примечание: Для промежуточных значений индукции следует выполнить интерполяцию табличных данных.

Для расчета тока холостого хода рассчитывается общая намагничивающая мощность магнитной системы

$$Q_x = K_T (q_c G_c + q_y G_y),$$

где q_c и q_y — удельные намагничивающие мощности для стали стержней и ярм по табл. 6 для соответствующих значений индукции B_c и B_y , В·А/кг. Коэффициент K_T учитывает увеличение намагничивающей мощности, вызванное воздействием ранее упомянутых конструктивных, технологических и других факторов. Для плоской шихтованной магнитной системы вышеназванных конструкций этот коэффициент может быть принят: при мощностях

25—630 кВ·А $K_T = 15—10$; 1000—6300 кВ·А $K_T = 5$;

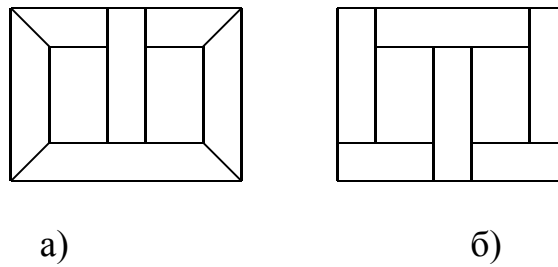


Рис. 2. Варианты плана шихтовки магнитной системы

Относительное значение тока холостого хода:

$$i_0 = \frac{Q_x}{10S} ;$$

активная составляющая, %

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10S} ;$$

реактивная составляющая, %

$$i_{0p} = \sqrt{i_0^2 - i_{0a}^2} ,$$

где P_x измеряется в Вт, Q_x — В·А; S — кВ·А .

Ток холостого хода может быть также определен для каждого стержня (каждой фазы обмоток) отдельно. При этом током холостого хода трансформатора считают среднее арифметическое трех токов

$$i_o = (i_{0a} + i_{0b} + i_{0c}) / 3 .$$

Реальный ток холостого хода

$$I_{0a} = i_{0a} I_{ном} / 100 ; I_{0p} = i_{0p} I_{ном} / 100 ; I_o = i_o I_{ном} / 100 ,$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток первичной обмотки (высшего напряжения),

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_x}{\sqrt{3} I_o U_{ном}} ; \quad \sin \varphi_0 = \frac{Q_x}{\sqrt{3} I_o U_{ном}} .$$

После определения потерь и тока холостого хода трансформатора следует полученные данные сравнить с контрольными.

Результаты расчета не должны сильно отличаться от контрольных данных.

Согласно ГОСТ отклонение потерь и тока холостого хода трансформатора от нормированного значения не должны быть больше +15% и +30% соответственно.

[1], §2.1,2.2; [3], §1.2; [4], § 8.2 и 8.3.

б) Параметры схемы замещения трансформатора рассчитываются по параметрам первичной обмотки (обмотки ВН) и получаются приведенными к этой обмотке

$$z_0 = U_{1\phi} / I_{оф}; \quad r_0 = z_0 \cos \varphi_0; \quad x_0 = z_0 \sin \varphi_0 .$$

[1], § 3.4; [2], § 2.6; [3], § 1.4.

в) При выполнении этого пункта следует произвести расчет значений величин по методу, указанному для п. 3, а для напряжений $U = (0,5; 0,7; 0,9; 1,00 \text{ и } 1,10)$ от $U_{ном}$;

г) Рассчитываются потери холостого хода при номинальном напряжении первичной обмотки (обмотки ВН) с учетом изменения индукции при изменении частоты. При этом

$$P_x = P_{x50} (B / B_{50})^2 (f / f_{50})^{1,3},$$

где P_{x50} , B_{50} и f_{50} — данные при частоте 50 Гц.

К пункту 4. а) Вначале рассчитать массу металла обмотки ВН и обмотки НН, используя размеры обмоток и их числа витков, приведенные в табл. 1 или 2, и эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток, выполненный по п. 2. Плотность металла обмоток меди $\gamma_m = 8900 \text{ кг/м}^3$, алюминия

$\gamma_a = 2700 \text{ кг/м}^3$. Потери короткого замыкания рассчитываются для каждой обмотки и затем суммируются

$$P_{очн} = P_{очн1} + P_{очн2} .$$

Потери короткого замыкания трансформатора P_k определяются для обмоток, имеющих номинальную эксплуатационную температуру $+75^\circ\text{C}$. При определении P_k учесть, что помимо основных (электрических) потерь в обмотках возникают добавочные потери. К потерям короткого замыкания относятся также потери в отводах (проводах) от обмоток к проходным изоляторам и переключающим устройствам, потери в стальных деталях крепления магнитной системы и в стенках бака, вызванные полем рассеяния обмоток и отводов. Все эти добавочные потери могут быть ориентировочно оценены средним коэффициентом по отношению к основным потерям, т. е.

$$P_k = P_{очн} k,$$

где k может быть принят для трехфазных трансформаторов мощностью до $100 \text{ кВ}\cdot\text{А}—1,03$; $160—630 \text{ кВ}\cdot\text{А}—1,06$; $1000—6300 \text{ кВ}\cdot\text{А}—1,12$.

Основные потери при $+75^\circ\text{C}$:

в медных обмотках $P_{очн.м} = 2,4 J^2 G_0$;

в алюминиевых обмотках $P_{очн.а} = 12,75 J^2 G_0$,

где J — плотность тока в обмотке, А/мм^2 ; G_0 — масса металла

обмотки, кг.

При выводе выражения $P_{\text{осн}}$ приняты указанные выше плотности металла обмоток и удельные электрические сопротивления при $+75^\circ\text{C}$: меди $\rho_{\text{м}}=0,02135$ мкОм·м и алюминия $\rho_{\text{а}}=0,0344$ мкОм·м.

б) Для определения напряжения короткого замыкания найти активную $r_{\text{к}}$ и реактивную $x_{\text{к}}$ составляющие сопротивления короткого замыкания трансформатора $z_{\text{к}}$. Потери короткого замыкания в трех фазах обмоток

$$P_{\text{к}} = 3 I_{\text{ном.ф}}^2 r_{\text{к}},$$

где $r_{\text{к}}$ — активное сопротивление одной фазы обмоток; $I_{\text{ном.ф}}$ — номинальное значение фазного тока;

$$r_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{3 I_{\text{ном.ф}}^2}, \text{ Ом}$$

$$x_{\text{к}} = \frac{7,9 f \pi w^2 d_{12}}{l} a_{\text{р}} k_{\text{р}} 10^{-6}, \text{ Ом}$$

где f — частота сети, Гц; w — число витков первичной обмотки; d_{12} — средний диаметр обмоток, м $d_{12} = D_1 + 2a_1 + a_{12}$;

$a_{\text{р}}$ — приведенная ширина канала рассеяния, м

$$a_{\text{р}} = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3};$$

$k_{\text{р}}$ — коэффициент учитывающий отклонение реального поля рассеяния от идеального параллельного. Для расположения обмоток согласно рис.1 $k_{\text{р}}$ может быть принят равным 0,95; l — высота обмоток, м.

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, фазное значение

$$U_{\text{а.ф}} = I_{\text{ном.ф}} r_{\text{к}}, \text{ В или } u_{\text{а}} = (U_{\text{а.ф}} / U_{\text{ном.ф}}) 100, \%$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, фазное значение

$$U_{\text{р.ф}} = I_{\text{ном.ф}} x_{\text{к}}, \text{ В или } u_{\text{р}} = (U_{\text{р.ф}} / U_{\text{ном.ф}}) 100, \%$$

где $x_{\text{к}}$ — реактивное сопротивление одной фазы обмоток, Ом;

$$z_{\text{к}} = \sqrt{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}; \cos \varphi_{\text{к}} = r_{\text{к}} / z_{\text{к}}$$

При расчете $z_{\text{к}}$, $u_{\text{к}}$ и их составляющих пользоваться фазными значениями номинального напряжения и тока первичной обмотки (обмотки ВН).

[1], § 3.5 и 3.6 ; [2], §2.6; [3], §1.4; [4], §7.1 и 7.2.

в) [1], §4.2 [2], §2.10; [3], §1.6;

К пункту 5. Привести все параметры трансформатора к первичной обмотке (обмотке ВН). При построении диаграммы условно считать, что $x_1=x_2'=x_k/2$ и $r_1=r_2'=r_k/2$. Принять $U_2'=U_{1ном}$.

[1], § 3.3; [2], §2.3; [3], § 1.3.

К пункту 6. а) При расчете КПД для различных значений I_2 следует учесть, что вместе с изменением нагрузки трансформатора при неизменном напряжении сети квадратично изменяются основные и добавочные потери в обмотках, потери, вызванные полем рассеяния обмоток и отводов в баке и крепежных конструкциях магнитной системы, а также потери в отводах. Потери в стали магнитной системы остаются практически неизменными.

б) Среднесуточный КПД равен отношению энергии, отданной трансформатором во вторичную сеть в течение суток к энергии, полученной трансформатором за тот же период из первичной сети.

Суточный КПД может быть найден по формуле

$$\eta = 1 - \frac{(\beta_1^2 t_1 + \beta_2^2 t_2 + \dots + \beta_n^2 t_n) P_k + 24 P_x}{\cos \varphi_2 (\beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_n t_n) S_{ном} + (\beta_1^2 t_1 + \beta_2^2 t_2 + \dots + \beta_n^2 t_n) P_k + 24 P_k},$$

где $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ — отношение тока нагрузки к номинальному току для отрезков времени t_1, t_2, \dots, t_n , выраженных в часах; $S_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; P_k и P_x — потери короткого замыкания и холостого хода трансформатора, кВт. [1], § 4.3; [2], § 2.10; [3], §1.6.

К пункту 7. В табл. 4 потери и напряжение короткого замыкания даны для номинальной мощности обмотки ВН — $S_{ном}$. При расчете параметров схемы замещения и других данных трансформатора их приводят к числу витков обмотки ВН. Расчет сопротивлений короткого замыкания r_k, x_k и z_k для пар обмоток ВН — СН; ВН — НН и СН — НН производят как для двухобмоточного трансформатора через заданные потери и напряжение короткого замыкания

$$r_k = \frac{P_k}{3I_{ном.ф}^2}; z_k = \frac{u_k U_{ном.ф}}{100I_{ном.ф}}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Параметры схемы замещения $x_1, x_2, x_3, r_1, r_2, r_3, z_1, z_2, z_3$ определяются на основании полученных r_k, x_k и z_k .

При построении векторной диаграммы трансформатора рекомендуется принять угол между токами I_2 и I_3 равным

$\alpha = \varphi_3 - \varphi_2$. Диаграмму построить по рис. 8.4 [1], или рис. 1.37 [3]

[1], § 8.1; [2], § 2. 12 [3], § 1.8 .

К пункту 8. В табл. 5 приведены данные двухобмоточных трехфазных автотрансформаторов. Потери и напряжения короткого замыкания отнесены к большему из линейных напряжений. Схему соединения обмоток см. на рис. 3.

[1], § 8.2; [2], §2.13; [3], § 1.7; [4], § 3.2.

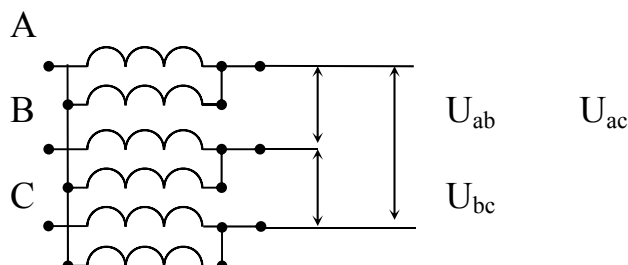


Рис. 3. Схема соединения обмоток автотрансформатора

К пункту 9. [1] § 6.1, 6.2 и 6.4; [2], § 2.11 [3], §1.9;

К пункту 10. Ударный ток короткого замыкания — наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания определяется по амплитудному значению тока короткого замыкания в соответствии с формулой

$$i_{\text{км}} = k_{\text{м}} \sqrt{2} I_{\text{к.уст}},$$

где $I_{\text{к.уст}} = I_{\text{ном}} 100/u_{\text{к}}$; $k_{\text{м}}$ — коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока, который может быть принят $k_{\text{м}} = 1,55$ для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А и $k_{\text{м}} = 1,70$ для трансформаторов мощностью 1000—6300 кВ·А; $I_{\text{к.уст}}$ — установившийся ток короткого замыкания.

[1], § 9.2; [2], § 2.6; [3], § 5.8; [4], § 7.3

К пункту 11. Для решения задачи распределения токов при несимметричной нагрузке пользуются методом симметричных составляющих. Для определения сопротивления нулевой последовательности z_{00} нужно использовать напряжение нулевой последовательности U_0 , приведенное в табл. 1 или 2, которое дается в процентах от номинального напряжения при токе нулевой последовательности, равном номинальному току:

$$U_0 = \frac{I_{\text{ном.ф}} z_{00}}{U_{\text{ном}}} 100, \text{ Ом}$$

Следует отметить, что в трансформаторах с магнитосвязанной трехфазной магнитной системой сопротивление нулевой

последовательности z_{00} значительно меньше сопротивления холостого хода z_0 .

[1] § 7.1- 7.4; [2], § 2.16 ; [3],1.10.

Указания к оформлению расчетного задания

1. Расчетное задание оформляется на листах писчей бумаги формата А4.

2. Текст пишется чернилами или шариковой ручкой или текст может быть набран в текстовом редакторе и распечатан. В тексте необходимо приводить все использованные формулы. Полученные значения величин должны снабжаться соответствующими размерностями. При использовании табличного и справочного материала дать в тексте краткие пояснения. Вычисления могут проводиться с применением МATHCAD или аналогичных программ.

3. Эскизы и графики оформляются на миллиметровой бумаге формата А4 или могут строиться в среде применяемых программных продуктов. Эскизы и графики выполняются в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД).

4. Расчетное задание брошюруется и снабжается титульным листом с указанием:

- а) названия расчетного задания;
- б) номера варианта и обозначение типа трансформатора;
- в) факультета и группы, фамилии и инициалов студента.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Токарев Б.Ф. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990, 624с.
- 2.Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2000, 627с.
- 3.Сергеенков Б.Н., Киселев В.М. , Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. М.: Высшая школа, 1989, 352с.
- 4.Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. М.: Издательский дом Альянс, 2009, 528с.
5. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. М.: Издательский центр Академия, 2013, 320с.

Основные данные трехфазных двухобмоточных трансформаторов с естественным масляным охлаждением с алюминиевыми (№ 1—18) и медными (№ 19—32) обмотками

№ п/п	Общие данные			Обмотки										Сердечник					Бак		Контрольные данные				Напряжение нулевой последовательности, %	
	Мощность S, кВ·А	Схемы и группы соединений	Номинальные напряжения, В		Число витков		Сечение витка, мм ²		Внутренний диаметр D ₁ , см	Радиальные размеры, см		Канал между обмотками ВН и НН а ₁₂ , см	Высота обмотки l ₁ —l ₂ , см	Диаметр стержня d, см	Активное сечение, см ²		Высота, см		Расстояние между осями С, см	Масса масла, кг	Масса бака, кг	P _к , Вт	P _х , Вт	u _к , %		i _о , %
			ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН		ВН	НН				стержень Пс	ярмо Пя	стержень h _с	ярмо h _я								
1	63	Y/Y-0	3300	230	710	49	9,1	84,5	11,9	3,5	1,4	1,4	40,0	11,0	80,6	92,4	44,0	10,5	26,0	170	80	1280	265	4,5	2,8	50
2	63	Y/Y-0	6000	420	1260	88	4,7	44,5	11,9	3,8	1,25	1,25	40,0	11,0	80,6	92,4	43,5	10,5	25,0	170	80	1280	265	4,5	2,8	50
3	63	Y/Y-0	10000	400	2100	84	2,83	46,8	11,9	3,75	1,3	1,3	39,5	11,0	80,6	92,4	43,4	10,5	25,5	170	80	1280	265	4,5	2,8	50
4	100	Y/Y-0	3300	230	605	42	10,9	192,5	12,4	3,15	2,2	1,1	49,5	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26,0	210	150	1970	365	4,5	2,6	50
5	100	Y/Y-0	6000	440	1125	82	5,43	99,6	12,5	3,0	2,2	1,2	49,0	11,5	90,2	107,9	53,0	11,5	26,5	210	150	1970	365	4,5	2,6	50
6	100	Y/Д-11	6300	400	1180	130	5,75	63,4	12,5	3,1	2,3	1,0	49,0	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26,5	210	150	1970	365	4,5	2,6	50
7	100	Y/Y-0	10000	400	1850	74	3,52	110,8	12,3	3,25	2,1	1,0	50,0	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26,0	210	150	1970	365	4,5	2,6	50
8	160	Y/Y-0	3000	230	394	30	20,7	235,6	14,8	3,7	2,7	0,9	46,5	14,0	134,2	141,1	51,5	13,5	30,7	295	220	2650	565	4,5	2,4	50
9	160	Д/У-11	3300	690	730	88	10,85	77,5	15,0	3,6	2,8	0,9	47,0	14,0	134,2	141,1	52,0	13,5	31,5	295	220	2650	565	4,5	2,4	50
10	160	Y/Д-11	6000	690	770	152	10,25	44,8	14,7	3,85	2,50	1,0	47,0	14,0	134,2	141,1	51,5	13,5	31,0	295	225	2650	565	4,5	2,4	50
11	160	Y/Y-0	10000	400	1273	51	6,15	132,6	14,8	3,95	2,45	0,95	46,5	14,0	134,2	141,1	51,5	13,5	30,7	295	225	2650	565	4,5	2,4	50
12	250	Y/Y-0	3300	230	358	25	33,5	348,0	16,0	4,5	2,5	1,0	55,0	15,0	155,1	168,1	59,0	14,5	33,5	340	260	3700	820	4,5	2,3	60
13	250	Д/У-11	6000	440	1200	46	10,65	181,0	16,0	4,5	2,5	1,1	55,0	15,0	155,1	168,1	60,0	14,5	34,0	340	260	3700	850	4,5	2,3	60
14	250	Y/Д-11	6000	690	630	126	17,8	64,4	16,0	4,0	2,5	1,2	54,0	15,0	155,1	168,1	59,0	14,5	34,0	340	260	3700	820	4,5	2,3	—
15	250	Y/Y-0	10000	400	1050	42	11,1	198,0	16,0	4,55	2,45	0,95	55,0	15,0	155,1	168,1	59,0	14,5	33,0	340	260	3700	820	4,5	2,3	60
16	630	Д/У-11	6000	400	624	24	29,2	469,0	21,0	5,2	3,15	0,9	59,3	20,0	271,6	282,6	66,0	19,5	40,5	790	480	7000	1420	5,0	1,5	70
17	1000	Д/У-11	6000	400	441	17	40,7	754,8	25,0	4,45	1,95	3,05	68,0	24,0	371,0	372,5	78,0	23,0	48,0	1500	900	10000	2400	5,5	1,4	70
18	1600	Y/Y-0	10000	400	376	15	63,1	1403,0	29,4	4,35	3,6	1,1	97,0	26,0	435,0	440,7	107,0	25,0	52,0	2400	1120	14500	3100	5,0	1,3	70
19	25	Y/Y-0	3300	230	1032	72	2,78	22,3	9,8	1,8	2,2	1,45	28,0	9,0	56,1	57,7	34,0	8,5	21,3	95	60	490	120	4,5	3,0	40
20	25	Y/Y-0	11000	230	3441	72	0,785	32,4	9,8	2,7	1,25	1,35	28,05	9,0	56,1	57,7	34,0	8,5	21,3	95	60	490	120	4,5	3,0	40
21	40	Y/Y-0	3000	230	938	72	4,01	54,2	9,8	2,7	1,55	1,05	43,0	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8	40
22	40	Y/Y-0	6000	400	1877	125	2,06	27,8	9,8	2,75	1,65	0,95	43,1	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8	40
23	40	Y/Y-0	10000	400	3128	125	1,23	27,8	9,8	2,7	1,65	0,95	43,1	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8	40
24	160	Y/Y-0	11000	440	1450	58	4,68	120	14,9	3,7	2,7	0,9	45,6	14,0	135,2	137,6	52,0	13,5	30,7	225	175	2100	460	4,5	1,7	50
25	250	Y/Y-0	11000	440	1100	44	7,3	154,8	17,0	3,65	2,6	1,2	49,5	16,0	166,0	172,0	55,5	15,5	33,0	315	225	3000	650	4,5	2,3	60
26	250	Y/Д-11	11000	190	1100	33	7,3	210	17,0	3,65	2,6	1,2	49,6	16,0	166,0	172,0	55,5	15,5	33,0	315	225	3000	650	4,5	2,3	—
27	400	Y/Д-11	11000	190	869	26	11,0	309,6	19,0	3,6	2,75	1,3	55,2	18,0	222,6	230,6	62,0	17,5	36,0	465	300	4100	900	5,0	1,5	—
28	400	Y/Y-0	11000	440	875	35	11,0	242,0	19,0	3,6	2,75	1,3	55,6	18,0	222,6	230,6	62,0	17,5	36,0	465	300	4100	900	5,0	1,5	60
29	630	Д/Д-0	11000	190	1158	20	11,1	564	21,0	4,45	3,4	1,4	58,0	20,0	271,6	282,6	66,0	19,5	40,5	800	480	5000	1400	5,5	1,6	—
30	630	Д/У-11	11000	440	1170	27	11,1	417,6	21,0	4,45	3,4	1,4	58,0	20,0	271,6	282,6	66,0	19,5	40,5	840	480	5100	1400	5,5	1,6	70
31	630	Y/Y-0	6600	420	409	26	34,8	412,8	21,0	4,4	3,4	1,4	60,0	20,0	271,6	282,6	66,0	19,5	40,5	840	480	5100	1400	5,5	1,6	70
32	1600	Д/У-11	11000	440	779	18	25,8	1120	27,0	4,55	3,6	1,9	97,0	26,0	463,5	469,5	107,0	25,0	52,0	2400	1120	12500	2400	5,5	1,3	70

Примечания:

- f=50 Гц.
- Трансформаторы № 1—18 с алюминиевыми обмотками; трансформаторы № 19—32 с медными обмотками.
- Обмотки ВН имеют пять ступеней напряжения: 95; 97,5; 100; 102,5; 105% от U_{ном}. Напряжения и числа витков обмотки ВН даны для средней ступени.

4. Магнитные системы собраны впереплет, с косыми стыками над крайними стержнями и прямым над средним стержнем, из холоднокатаной стали марки 3404 — 0,35 мм по ГОСТ 21427-83

5. Напряжение нулевой последовательности в процентах от номинального фазного отнесено к току нулевой последовательности, равному номинальному току.

6. Обмотки НН трансформаторов № 1—5, 7—10, 11—13, 15—25, 28, 30—32 соединены по схеме звезда с нулевым выводом

СОДЕРЖАНИЕ

1. Расчетное задание по трансформаторам и автотрансформаторам.....	3
2 Методические указания по трансформаторам и автотрансформаторам.....	8
3. Указания к оформлению.....	16
Литература.....	16

Учебное издание

Качалина Елена Викторовна
Коробков Сергей Алексеевич

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ, ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Методические указания

Для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика и электротехника»

Редактор издательства

Темплан издания МЭИ 216.(метод.)	Подписано в печать	
Печать офсетная	Физ. печ л. 1,25+вкл	
Тираж	Изд. №	Заказ

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14
Отпечатано в