

## О РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРАХ И РЕЖИМАХ РАБОТЫ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

И. Д. КУТЯВИН, В. А. ЗОРИН, Д. И. АНДЕРМАН

При проектировании и эксплуатации автотрансформаторов (АТ) возникает необходимость в определении расчетных параметров и режимов их работы. В частности, желательно бывает знать распределение токов в обмотках при различной их загрузке в режиме трехобмоточного трансформатора, расчетные токи и мощности обмоток, соотношения сечений проводов, весов меди, потерь в обмотках и т. д.

Ниже рассматриваются в режиме трехобмоточного трансформатора:

- а) повышающие блочные АТ (рис. 1, а) с первичной обмоткой (НН) низшего напряжения,
- б) повышающие АТ с первичной обмоткой (СН) среднего напряжения (рис. 1, б),
- в) понижающие АТ с первичной обмоткой (ВН) высшего напряжения (рис. 1, в).

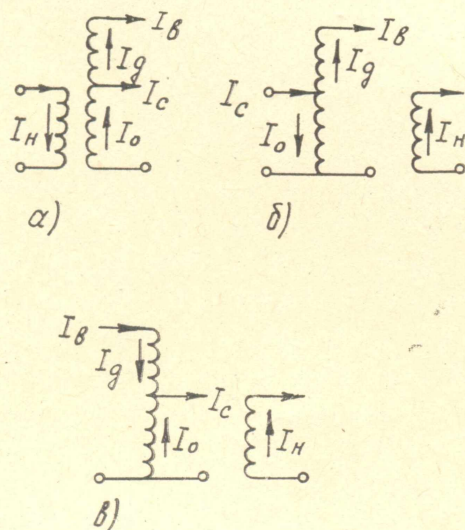


Рис. 1

Условные обозначения токов показаны на схемах рис. 1. Расчетные мощности, веса меди, потери сопровождаются теми же индексами.

Если для предварительной ориентировочной оценки параметров АТ принять для всех обмоток одинаковую плотность тока  $\Delta$ , то сечения проводов обмоток будут пропорциональны их расчетным токам и найдутся из выражения

$$q_n = \frac{I_p}{\Delta} = \frac{S_p}{\sqrt{3}U\Delta}. \quad (1)$$

Площадь сечения меди всей обмотки с числом витков

$$q_m = q_n w = \frac{S_p}{\sqrt{3}E\Delta}. \quad (2)$$

Вес меди обмотки

$$Q_m = q_m l \gamma = \frac{l \gamma S_p}{\sqrt{3}E\Delta}. \quad (3)$$

Потери в меди обмоток

$$P_m = \alpha \Delta^2 Q_m = \alpha \Delta \frac{l \gamma S_p}{\sqrt{3}E}; \quad \alpha = \frac{\rho}{\gamma}, \quad (4)$$

где

- $S_p$  — расчетная мощность обмотки,
- $l$  — длина среднего витка обмотки,
- $E$  — эдс витка,
- $\gamma$  — удельная плотность и
- $\rho$  — удельное сопротивление материала обмотки.

Расчетная мощность обмоток ВН всех трех типов АТ обычно равна проходной мощности  $S_n$ ; обмотка СН для первого типа АТ может иметь расчетную мощность в пределах  $(0,5 \div 1,0) S_n$ , а для двух последних типов равна проходной  $S_n$ . Расчетная мощность обмотки НН для первого типа равна проходной, а для двух последних типов может находиться в пределах  $(0,25 \div 1,0) S_n$ .

Расчетную мощность дополнительной (последовательной) части автотрансформаторной (АТ) обмотки можно определить из выражения

$$S_{pg} = \sqrt{3}I_g(U_B - U_C) = S_n(1 - N), \quad (5)$$

где

$N$  — коэффициент трансформации АТ обмотки, равный отношению среднего напряжения  $U_C$  к высшему  $U_B$ .

Расчетная мощность общей (параллельной) части АТ обмотки (рис. 1) для блочного АТ

$$S_{p01} = \sqrt{3}U_C(I_C + I_B) = U_C \left[ \frac{p_c S_n}{U_C} - \frac{(1 - p_c) S_n}{U_B} \right] = S_n [p_c + N(1 - p_c)]. \quad (6)$$

То же для повышающего АТ с первичной обмоткой СН

$$S_{p02} = \sqrt{3}U_C(I_C - I_B) = U_C \left[ \frac{S_n}{U_C} - \frac{S_n(1 - p_n)}{U_B} \right] = S_n [1 - N(1 - p_n)]. \quad (7)$$

То же для понижающего АТ с первичной обмоткой ВН

$$S_{p03} = \sqrt{3}U_C(I_C - I_B) = U_C \left[ \frac{S_n(1 - p_n)}{U_C} - \frac{S_n}{U_B} \right] = S_n(1 - p_n - N), \quad (8)$$

где

- $p_c$  — относительная расчетная мощность обмотки СН,
- $p_n$  — то же для обмотки НН.

В табл. 1 приведена зависимость отношения расчетной мощности общей части обмотки АТ  $S_{p0}$  к проходной  $S_n$  от переменных параметров  $P$  и  $N$ , вычисленная из выражений (6) — (8). Для блочных АТ (пункты

1-6) расчетная мощность  $S_{p01}$  растет с увеличением  $p_c$  и  $N$ . Суммарная расчетная мощность обмоток блочного АТ может быть вычислена с учетом (5) и (6) из выражения

$$S_{c1} = S_H + S_{pg} + S_{p01} = S_H[2 + p_c(1 - N)], \quad (9)$$

Таблица 1

Тип АТ	№№ пп.	$P \backslash N$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{4}$	1,0
Блочные	1	0,00	0,25	0,33	0,50	0,67	0,75	1,00
	2	0,25	0,44	0,50	0,63	0,75	0,81	1,00
	3	0,50	0,63	0,67	0,75	0,83	0,88	1,00
	4	0,60	0,70	0,73	0,80	0,87	0,90	1,00
	5	0,75	0,81	0,83	0,88	0,92	0,94	1,00
	6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Повышающие	7	0,00	0,75	0,67	0,50	0,33	0,25	0
	8	0,25	0,81	0,75	0,63	0,50	0,44	0,25
	9	0,50	0,88	0,83	0,75	0,67	0,62	0,50
	10	0,60	0,90	0,88	0,80	0,73	0,70	0,60
	11	0,75	0,94	0,92	0,88	0,83	0,81	0,75
	12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Понижающие	13	0,00	0,75	0,67	0,50	0,33	0,25	0
	14	0,25	0,50	0,42	0,25	0,08	0	0,25
	15	0,50	0,25	0,17	0	0,17	0,25	0,50
	16	0,60	0,15	0,07	0,10	0,27	0,35	0,60
	17	0,75	0	0,08	0,25	0,42	0,50	0,75
	18	1,00	0,25	0,33	0,50	0,67	0,75	1,00

Для повышающих АТ (пункты 7-12) мощность  $S_{p02}$  уменьшается с увеличением  $N$  и растет с увеличением  $p_H$ . Суммарная мощность обмоток АТ этого типа с учетом (5) и (7)

$$S_{c2} = p_H S_H + S_{pg} + S_{p02} = S_H[2(1 - N) + p_H(1 + N)]. \quad (10)$$

Для понижающих АТ (пункты 13-18) зависимость  $S_{p03}$  от  $p_H$  и  $N$  оказывается более сложной ввиду того, что мощность  $S_{p03}$  может иметь отрицательный знак и алгебраическое суммирование ее с мощностями других обмоток приведет к ошибке. Из табл. 1 (пункты 13-18) видно, что наибольшая величина мощности  $S_{p03\text{ м}}$  (которая и является расчетной) имеет место при  $p_H = 0$  или 1. Тогда суммарная расчетная мощность обмоток понижающего АТ

$$S_{c3} = p_H S_H + S_{pg} + S_{p03\text{ м}}. \quad (11)$$

Суммарная расчетная мощность обмоток трехобмоточного трансформатора при расчетной мощности одной из вторичных обмоток  $p S_H$

$$S_{ct} = S_H(2 + p). \quad (12)$$

Данные табл. 2 для суммарных расчетных мощностей обмоток АТ в относительных единицах, вычисленные из (9) — (12) при  $p = 0,5$  и 1,0, дают представление о расходе меди на изготовление обмоток АТ и трехобмоточных трансформаторов одинаковой проходной мощности, так как в соответствии с (3) расход меди пропорционален расчетной мощности обмотки. Экономия меди на изготовление обмоток АТ, вытекающая из табл. 2, занижена, так как она соответствует одинаковой длине среднего витка  $l$ , а для обмоток АТ значение  $l$  будет меньше. Кроме того, сокращаются размеры окна и, следовательно, вес стали; уменьшаются потери в меди и стали.

Таблица 2

№№ пп.	Обозн. 1	N P	1	1	1	2	3	1
			4	3	2	3	4	
1	S <sub>с1</sub>	0,5	2,38	2,33	2,25	2,17	2,13	2,00
2	S <sub>с2</sub>	»	2,13	2,00	1,75	1,5	1,38	1,00
3	S <sub>с3</sub>	»	2,00	1,84	1,5	1,16	1,00	0,50
4	S <sub>ст</sub>	»	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
5	S <sub>с1</sub>	1,0	2,75	2,67	2,50	2,33	2,25	2,00
6	S <sub>с2</sub>	»	2,75	2,67	2,50	2,33	2,25	2,00
7	S <sub>с3</sub>	»	2,50	2,33	2,00	1,67	1,50	1,00
8	S <sub>ст</sub>	»	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
9	2S <sub>с3</sub>	0,5	4,00	3,68	3,00	2,33	2,00	1,00
10	—	—	1,25	1,00	0,50	0	-0,25	-1,00

Из-за отсутствия блочных АТ в настоящее время применяют для блоков понижающие АТ удвоенной мощности с  $p_H=0,5$ . Суммарная мощность обмоток АТ, найденная удвоением данных пункта 3 (табл. 2), приведена в пункте 9. Перерасход меди в этом случае будет характеризоваться разностью данных пунктов 9 и 5 и приведен в пункте 10.

При определении суммарных потерь в меди обмоток АТ по выражению (4) нужно учитывать распределение нагрузки между вторичными обмотками. Предположим, что относительная загрузка обмотки СН блочного АТ составляет  $x$  долей единицы, тогда относительная загрузка обмотки ВН составит  $(1-x)$ .

Ориентировочно относительные суммарные потери в меди обмоток блочного АТ определяются из выражения

$$P_{мх1} = 1 + (1-x)^2(1-N) + \left(\frac{I_c}{I_{p01}}\right)^2 [x + N(1-x)]^2. \quad (13)$$

Для повышающего АТ с первичной обмоткой СН

$$P_{мх2} = \frac{x^2}{p_H} + (1-x)^2(1-N) + \left(\frac{I_c}{I_{p02}}\right)^2 [1 - N(1-x)]^2. \quad (14)$$

Для понижающего АТ с первичной обмоткой ВН

$$P_{мх3} = \frac{x^2}{p_H} + (1-N) + \left(\frac{I_c}{I_{p03}}\right)^2 (1-x-N)^2. \quad (15)$$

Для трехобмоточного трансформатора

$$P_{мх} = 1 + \frac{x^2}{p_H} + \frac{(1-x)^2}{p_C}. \quad (16)$$

Расчетный ток общей части АТ обмотки (по которому определяется сечение провода обмотки) для блочного АТ с учетом (6)

$$I_{p01} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_c} [p_C + N(1-p_C)]. \quad (17)$$

То же для повышающего АТ с учетом (7)

$$I_{p02} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_c} [1 - N(1-p_H)]. \quad (18)$$

То же для понижающего АТ с учетом (8).

$$I_{p03} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_c} (1 - N - p_H). \quad (19)$$

В табл. 3 показано соотношение потерь в обмотках АТ (пункты 1—18) и трехобмоточного трансформатора (пункт 19) для сочетания входных мощностей обмоток 100/100/100%. Суммарные относительные

потери мощности в обмотках АТ вычислялись из выражений (13)-(15), а для трехобмоточного трансформатора из (16) при  $p=1$ .

Таблица 3

Тип АТ	№№ пп.	$\frac{x}{N}$	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Блочный	1	$\frac{1}{2}$	1,81	1,64	1,57	1,58	1,61	1,75	2,00
	2	$\frac{1}{3}$	1,78	1,65	1,60	1,62	1,65	1,77	2,00
	3	$\frac{1}{2}$	1,75	1,68	1,67	1,69	1,72	1,83	2,00
	4	$\frac{2}{3}$	1,78	1,75	1,76	1,77	1,80	1,90	2,00
	5	$\frac{3}{4}$	1,81	1,80	1,81	1,82	1,85	1,93	2,00
	6	1,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Повышающий	7	$\frac{1}{4}$	1,31	1,16	1,15	1,21	1,29	1,57	2,00
	8	$\frac{1}{3}$	1,12	1,02	1,06	1,11	1,22	1,54	2,00
	9	$\frac{1}{2}$	0,75	0,72	0,83	0,94	1,08	1,47	2,00
	10	$\frac{2}{3}$	0,44	0,47	0,64	0,78	0,95	1,40	2,00
	11	$\frac{3}{4}$	0,31	0,36	0,55	0,70	0,89	1,37	2,00
	12	1,0	0,00	0,08	0,32	0,50	0,72	1,28	2,00
Понижающий	13	$\frac{1}{4}$	1,31	1,09	1,03	1,06	1,13	1,39	1,81
	14	$\frac{1}{3}$	1,12	0,93	0,90	0,95	1,04	1,33	1,78
	15	$\frac{1}{2}$	0,75	0,63	0,67	0,75	0,85	1,23	1,75
	16	$\frac{2}{3}$	0,44	0,39	0,49	0,61	0,76	1,19	1,77
	17	$\frac{3}{4}$	0,31	0,31	0,43	0,56	0,73	1,19	1,81
	18	1,0	0,00	0,018	0,32	0,50	0,72	1,28	2,00
3 обм. тр-р	19	—	2,00	1,68	1,52	1,50	1,52	1,68	2,00

Как видно из табл. 3, повышающий и понижающий АТ при всех соотношениях нагрузок вторичных обмоток имеют существенно меньшие потери в меди по сравнению с трехобмоточным трансформатором. Только блочный АТ при загрузках обмотки СН в пределах (40-80) % имеет несколько большие потери за счет уменьшенного веса меди обмоток.

Несмотря на приближенность и неполноту приведенного исследования, подтверждается весьма существенная выгода замены трехобмоточных трансформаторов автотрансформаторами. Такую замену можно произвести во всех случаях, когда сети среднего и высшего напряжений имеют одинаковый режим нейтрали.