

Особенности измерений сопротивления обмоток постоянному току силовых трансформаторов

- Шинкаренко Г. В.¹, канд. техн. наук, Донецкая обл., Горловка

Дан анализ процессов изменения магнитной индукции в магнитопроводе силовых трансформаторов при измерениях сопротивления обмоток постоянному току. Разработана методика расчёта времени, необходимого для выхода на режим измерения. Показано, что это время пропорционально отношению номинального напряжения обмотки к напряжению от источника питания измерительного прибора. Отмечается также, что время, необходимое для выхода на режим измерения сопротивления обмоток постоянному току на боковых стержнях, меньше, чем аналогичное время для обмотки на среднем стержне. Методика подтверждена практическими измерениями на силовых трансформаторах Донбасской электроэнергетической системы.

Ключевые слова: силовой трансформатор, магнитопровод, обмотка, сопротивление обмоток постоянному току, измерение.

Сопротивление обмотки постоянному току $R_{об}$ является одним из важнейших параметров, характеризующих техническое состояние силового трансформатора. Измерения $R_{об}$ делаются при вводе в эксплуатацию, капитальных ремонтах и комплексных испытаниях трансформаторов [1].

Практика показала, что при испытаниях силовых трансформаторов класса 220 – 750 кВ использование традиционных методов измерения $R_{об}$ методом амперметра-вольтметра приводит к значительным затратам времени. Это связано с большой индуктивностью обмоток высокого напряжения.

В настоящее время появились специализированные автоматические приборы (САП), позволяющие существенно сократить время измерений. Принцип действия многих из них заключается в том, что на обмотку трансформатора $w_{об}$ (рис. 1) до момента возрастания тока $i_{об}$ в ней до заданного значения $I_{об,изм}$, при котором производятся измерения $R_{об}$, подаётся максимальное постоянное напряжение $U_{п}$. Затем в работу вступает регулятор тока, который поддерживает значение $I_{об,изм}$ с необходимой точностью. Требования к диапазону коле-

баний $i_{об}$ в процессе измерений определяются ГОСТ 3484.1-88 [2]. Одним из элементов САП является балластный резистор R_b , через который замыкается ток обмотки при работе регулятора тока или при отключении источника постоянного напряжения. В табл. 1 приведены краткие сведения о САП известных фирм.

Для эксплуатации важно знать, как уменьшаются затраты времени при применении конкретных САП в процессе измерений сопротивления обмоток.

Время, необходимое для выхода обмотки на режим измерения, можно найти, зная начальную (остаточную) B_r и конечную $B_{изм}$ индукции в стержне магнитопровода. Для холоднокатаных электротехнических сталей, применяемых в трансформаторостроении, паспортному току намагничивания $I_{п.пас}$ соответствует рабочая индукция в стержнях $B_p \approx 1,65$ Тл [3, 4].

В момент $t_{изм}$, когда ток в обмотке достигает значения $I_{об,изм}$, индукция в стержне становится равной $B_{изм}$. Тогда

$$t_{изм} = \frac{Sw_{об}}{U_{п}} \Delta B_{изм}, \quad (1)$$

где $\Delta B_{изм} = B_{изм} - B_r$; S и $w_{об}$ – сечение и число витков обмотки стержня.

В выражении (1) под $U_{п}$ понимается среднее значение напряжения на выводах обмотки на интервале времени $0 - t_{изм}$.

Известна связь между номинальным линейным напряжением промышленной частоты $U_{л.н.}$, приложенным к обмотке трансформатора, и рабочей индукцией B_p в стержне его магнитопровода:

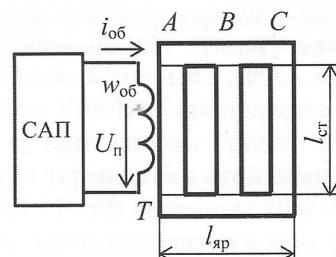


Рис. 1. Схема измерения $R_{об}$

$$U_{\text{л.н}} = 222\sqrt{3}w_{\text{об}}B_p.$$

Следовательно, выражение (1) примет вид

$$t_{\text{изм}} = \frac{1}{222\sqrt{3}} \frac{U_{\text{л.н}}}{U_{\text{п}}} \Delta B_{\text{изм*}}, \quad (2)$$

где

$$\Delta B_{\text{изм*}} = \frac{\Delta B_{\text{изм}}}{B_p}.$$

Остаточная индукция в стержнях определяется переходными процессами в контурах, содержащих обмотки трансформатора и ёмкости его ошиновки, и B_r не выходит за пределы $-0,6 \div 0,6$ Тл [4, 5]. Большего значения остаточная индукция может достичь после измерения $R_{\text{об}}$.

Для получения показателя, дающего возможность оценки производительности приборов, предназначенных для автоматического измерения сопротивления обмоток, рассматривается случай их использования после измерений потерь ХХ при малом напряжении [2], когда магнитопровод трансформатора предварительно размагнчен, т.е. при $B_r = 0$ и $\Delta B_{\text{изм*}} = B_{\text{изм*}}$.

Для определения $t_{\text{изм}}$ необходимо найти зависимость $B_{\text{изм*}}$ от заданной величины $I_{\text{об.изм}}$, используя при этом параметры трансформатора, которые известны в эксплуатации.

Дальнейшие рассуждения делаются при следующих допущениях:

считаем сечения стержня и ярма одинаковыми; пренебрегаем дополнительными активными и реактивными потерями, вызванными наличием стыков пластин холоднокатаной электротехнической стали в углах магнитопровода [6].

При изготовлении магнитопроводов мощных силовых трансформаторов применялись удовлетворяющие ГОСТ 21427.1-83 [7] электротехнические стали марок 3404 \div 3408 производства Верхне-Исетского завода (ВИЗ) и Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК). По кривым зависимости амплитуды магнитной индукции от действующего значения напряжённости переменного магнитного поля, приведённым в [8], можно определить действующие значения рабочей на-

пряжённости магнитного поля $H_{\text{п.д}}$, зная амплитуду рабочей индукции B_p . Напряжённости $H_{\text{п.д}}$ соответствует значение тока намагничивания $I_{\mu\text{-пас}}$.

Согласно [2], у трёхфазного трансформатора паспортный ток намагничивания определяется как среднее арифметическое значений токов намагничивания трёх фаз при подаче трёхфазного напряжения

$$I_{\mu\text{-пас}} = \frac{1}{3}(I_{\mu.A} + I_{\mu.B} + I_{\mu.C}),$$

где $I_{\mu.A}, I_{\mu.B}, I_{\mu.C}$ – токи намагничивания фаз A, B, C .

Ток намагничивания фазы B , у которой длина силовой линии l_μ равна длине стержня $l_{\text{ст}}$, будет меньше, чем фаз A и C с большим значением l_μ на длину ярма $l_{\text{яр}}$, т.е. $l_\mu = l_{\text{ст}} + l_{\text{яр}}$. При одинаковом для всех фаз значении $H_{\text{п.д}}$

$$I_{\mu.A} = I_{\mu.C} = \frac{l_{\text{ст}} + l_{\text{яр}}}{w_{\text{об}}} H_{\text{п.д}}; I_{\mu.B} = \frac{l_{\text{ст}}}{w_{\text{об}}} H_{\text{п.д}}.$$

Тогда

$$I_{\mu\text{-пас}} = \frac{1}{w_{\text{об}}} l_{\text{ст}} \frac{3 + 2l_{\text{яр*}}}{3} H_{\text{п.д}}, \quad (5)$$

где $l_{\text{яр*}} = l_{\text{яр}}/l_{\text{ст}}$.

При измерениях на постоянном токе необходимо принимать во внимание участие в магнитном контуре двух параллельных стержней других фаз, обмотки которых не задействованы в измерениях. В случае работы всех участков магнитной цепи в линейной области зависимости $B(H)$, имеющих одинаковую площадь сечения, преобразовывая параллельное соединение магнитных сопротивлений двух участков цепи с незадействованными в измерениях обмотками в одно магнитное сопротивление, можно записать:

для фаз A и C

$$I_{\text{об.}A} = I_{\text{об.}C} = \frac{l_{\text{ст}}}{w_{\text{об}}} (1 + l_{\text{яр*}} + m)H; \quad (6)$$

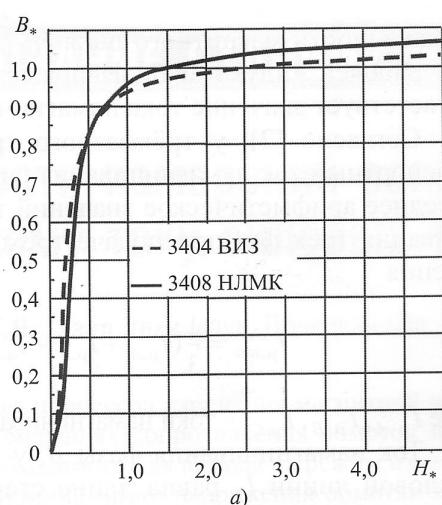
для фазы B

$$I_{\text{об.}B} = \frac{l_{\text{ст}}}{w_{\text{об}}} (1 + v)H. \quad (7)$$

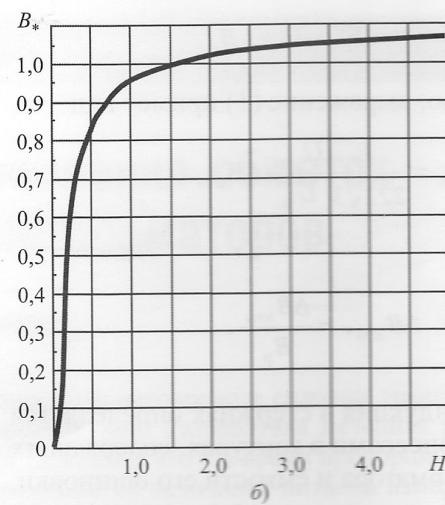
Таблица 1

Специализированные автоматические приборы для измерения сопротивления обмоток трансформаторов постоянному току

Страна	Фирма	Тип прибора	$U_{\text{п.}}$, В	$I_{\text{об.изм}}$, А
Англия	MEGGER	MTO 300	40	0,01 – 10
		MTO 210	50	0,01 – 10
Украина	ОЛТЕСТ	СА-640	60	0,002 – 25
США	Vanghard	TRM-203	60	1 – 20
Россия	Динамика	PET-MOM	100	0,012 – 12



a)



б)

Рис. 2. Графики зависимости $B_*(H_*)$ для разных электротехнических сталей (а) и кривая обобщённой зависимости (б)

В приведённых выражениях

$$\nu = \frac{1 + l_{\text{яр}}^*}{2}; \quad m = \frac{1 + l_{\text{яр}}^*}{2 + l_{\text{яр}}^*}.$$

Из уравнений (5), (6) и (7) при $I_{\text{об. } A} = I_{\text{об. } B} = I_{\text{об. } C} = I_{\text{об.изм}}$ можно получить:

$$H_{A,C*} = H_{A*} = H_{C*} = k_{A,C} I_{\text{об.изм}*}; \quad H_{B*} = k_B I_{\text{об.изм}*}, \quad (8)$$

где

$$k_{A,C} = \frac{1}{3} \frac{3 + 2l_{\text{яр}}^*}{1 + l_{\text{яр}}^* + m}; \quad k_B = \frac{1}{3} \frac{3 + 2l_{\text{яр}}^*}{1 + \nu}; \quad (9)$$

$$I_{\text{об.изм}*} = \frac{I_{\text{об.изм}}}{I_{\mu\text{-пас}}}; \quad H_{A,C*} = \frac{H_{A,C}}{H_{\mu\text{-д}}}; \quad H_{B*} = \frac{H_B}{H_{\mu\text{-д}}}.$$

Возрастание индукции при подаче напряжения U_n и $B_r = 0$ будет происходить по начальной кривой намагничивания, которая практически совпадает с основной [3]. На рис. 2, а изображены основные кривые намагничивания в виде зависимостей $B_*(H_*)$ для сталей 3404 ВИЗ и 3408 НЛМК. Кривые для остальных марок сталей (3404 – 3407 НЛМК и 3405, 3406 ВИЗ) располагаются внутри границ, образованных указанными зависимостями. Для получения максимального значения $B_{\text{изм}*}$, учитывая, что марка стали, применённой в магнитопроводе конкретного трансформатора, в эксплуатации, как правило, не известна, на рис. 2, б построена кривая, которая является огибающей со стороны больших значений B_* , даваемых зависимостями $B_*(H_*)$ на рис. 2, а при одинаковых H_* . Кривая рис. 2, б используется в качестве базовой при расчёте времени выхода на режим измерения.

При значениях $H_* > 1$ кривая намагничивания проходит область перегиба и магнитное сопротивление участка $l_{\text{ct}} + l_{\text{яр}}$ при измерениях на фазе A или C и участка l_{ct} при измерениях на фазе B резко возрастает. В этом случае влияние участка магни-

топровода $l_{\text{экт},C}$ или $l_{\text{экт},B}$ резко падает и им можно пренебречь [3]. Тогда

$$k_{A,C} = \frac{1}{3} \frac{3 + 2l_{\text{яр}}^*}{1 + l_{\text{яр}}^*}; \quad k_B = \frac{1}{3} (3 + 2l_{\text{яр}}^*). \quad (10)$$

В приведённых формулах (9) и (10) не известна величина $l_{\text{яр}}^*$. Её можно определить, зная результаты опытов холостого хода при малом напряжении, проводимых в энергосистемах.

Потери холостого хода, т.е. потери в магнитопроводе, при синусоидальной индукции равны сумме потерь в стержнях и ярмах магнитопровода [9] и будут ориентировочно пропорциональны их объёмам:

$$P_{XX,\text{ст}} = P_{c,\text{уд}} S_{\text{ст}}, \quad P_{XX,\text{яр}} = P_{c,\text{уд}} S_{\text{яр}},$$

где $P_{c,\text{уд}}$ – удельные потери в стали.

В опытах XX производят измерения потерь при подаче напряжения на фазы A и B (потери $P_{XX,ab}$), B и C (потери $P_{XX,bc} = P_{XX,ab}$), C и A (потери $P_{XX,ca}$). Так как

$$P_{XX,ab} = 2P_{XX,\text{ст}} + P_{XX,\text{яр}} = P_{c,\text{уд}} S(2l_{\text{ст}} + l_{\text{яр}})$$

и

$$P_{XX,ca} = 2P_{XX,\text{ст}} + 2P_{XX,\text{яр}} = 2P_{c,\text{уд}} S_{\text{ст}}(l_{\text{ст}} + l_{\text{яр}}),$$

то

$$\frac{P_{XX,ab}}{P_{XX,ca}} = P_{XX,ab*} = \frac{2 + l_{\text{яр}}^*}{2(1 + l_{\text{яр}}^*)}.$$

Отсюда

$$l_{\text{яр}}^* = \frac{2(1 - P_{XX,ab*})}{2P_{XX,ab*} - 1}.$$

В табл. 2 для ряда трансформаторов приведены усреднённые значения $P_{XX,ab*}$, полученные по результатам заводских и эксплуатационных опытов

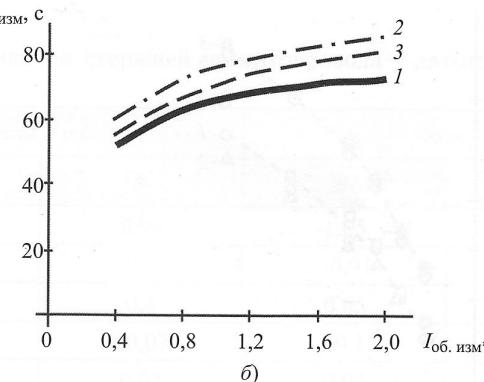
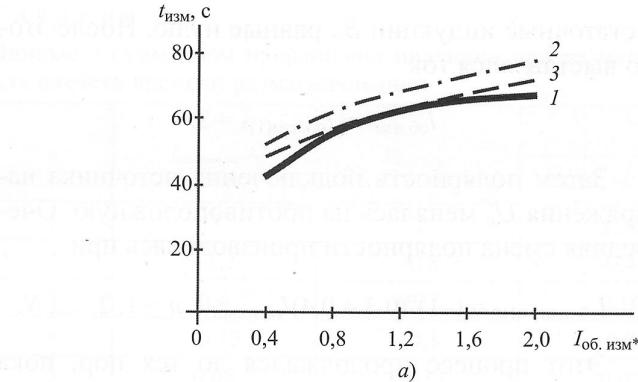


Рис. 3. Графики зависимости времени измерения от тока измерения, полученные в результате расчётов и опытов на автотрансформаторах:

a – для обмоток фаз *A, C*; *б* – для обмоток фазы *B*; 1 – расчёт; 2 – опыт при $I_{\text{XX}} = 0,42\%$ для АТДЦТН-200000/330/110/10,5; 3 – опыт при $I_{\text{XX}} = 0,34\%$ для АТДЦТН-200000/330/110/10,5

холостого хода, и рассчитанные коэффициенты $k_{A, C}$ и k_B .

На основе анализа данных, представленных в табл. 2, выражения (8) можно записать в виде простых формул, которые, применяя базовую кривую рис. 2, *б*, можно использовать при оценке времени $t_{\text{изм}}$, а именно:

$$\text{для } H_* \leq 1 \quad H_{A, C}^* \approx 0,6I_{\text{об.изм}*}; \quad H_B^* \approx 0,9I_{\text{об.изм}*}; \quad (11)$$

$$\text{для } H_* > 1 \quad H_{A, C}^* \approx 1 + 0,8(I_{\text{об.изм}*} - 1,67); \\ H_B^* \approx 1 + 2,4(I_{\text{об.изм}*} - 1,11). \quad (12)$$

В выражении (1) не учитывается падение напряжения на активном сопротивлении обмотки. Однако, как показал анализ паспортных данных силовых трансформаторов напряжением 220 – 330 кВ и мощностью 63 000 кВ·А и выше, оно в подавляющем числе случаев не превышает 3 В при $I_{\text{об.изм}*} \leq 2$, что существенно меньше напряже-

ния $U_n = 40 \div 100$ В, применяемого у большинства САП (см. табл. 1).

На рис. 3 построены кривые зависимостей $t_{\text{изм}}$ от $I_{\text{об.изм}*}$, полученные в результате расчётов и реальных измерений времени $t_{\text{изм}}$ при $U_n = 12,6$ В для обмоток ВН фаз *A(C)* и *B* ($t_{\text{изм}, A, C}$ и $t_{\text{изм}, B}$) автотрансформаторов типа АТДЦТН-200000/330/110 ($R_{\text{об}} = 0,8$ Ом). Перед каждым измерением проводилось размагничивание магнитопровода. Полученные результаты показывают приемлемую сходимость расчётных и экспериментальных результатов.

Правильность предложенных расчётных формул и базовой кривой $B_*(H_*)$ проверялась дополнительно следующим образом. Для одного из упомянутых трансформаторов, у которого $I_{\text{XX}} = 0,42\%$ ($I_{\text{XX}} = 1,5$ А), были проведены два опыта для получения максимальных остаточных индукций после спада тока $I_{\text{об.изм}*}$ от 2 отн. ед. до нуля:

1. Отключение U_n при $R_6 = 20$ Ом;

Таблица 2

Значения коэффициентов k для ряда силовых трансформаторов

Тип трансформатора	Число использовавшихся для расчёта $P_{\text{XX}, ab}^*$		Среднее значение $P_{\text{XX}, ab}^*$	I_{sp}^*	$H_* < 1$	$H_* > 1$	
	трансформаторов	опытов XX			k_B	$k_{A, C}$	k_B
АТДЦТН-200000/330/110/10,5	22	38	0,677	1,82	0,92	0,78	2,21
АТДЦТН-240000/330/220/10,5	1	2	0,656	2,21	0,91	0,77	2,47
АТДЦТН-250000/330/220/38,5	3	3	0,687	1,67	0,78	0,79	2,11
АТДЦТН-200000/220/110/10,5	3	3	0,652	2,29	0,95	0,77	2,53
АТДЦТН-250000/220/110/10,5	7	12	0,649	2,36	0,96	0,77	2,59
АТДЦТН-250000/220/110/38,5	4	7	0,673	1,89	0,92	0,78	2,26
ТРДН-160000/220/11/11	2	4	0,751	0,99	0,83	0,83	1,66
ТРДН-32000/220/11/11	2	4	0,686	1,69	0,91	0,79	2,13
ТДЦ-125000/220/10,5	1	2	0,733	1,15	0,85	0,82	1,77
АТДЦТНГУ-60000/220/121/38,5	2	3	0,708	1,4	0,88	0,81	2,27

Примечание. При $H_* < 1$ коэффициент $k_{A, C} = 0,63$ для всех трансформаторов.

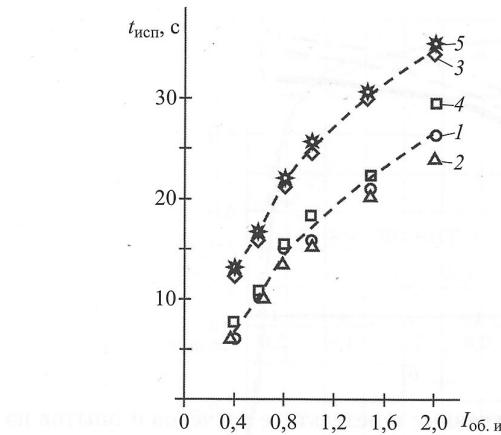


Рис. 4. График зависимости токов измерения от времени его получения при наличии остаточной индукции в стержнях магнитопровода:

трансформатор АТДЦН-200000/330/110/10,5 с $I_{\text{XX}} = 0,42\%$; 1 – отключение U_n , фаза A; 2 – реверс U_n , фаза C; 3 – реверс U_n , фаза B; 4 – отключение U_n , фаза C; 5 – отключение U_n , фаза B

2. Включение U_n с противоположной полярностью.

После каждого опыта для каждой фазы производили включение U_n и измерения времени получения токов $I_{\text{об.изм}}^*$ вплоть до значения $I_{\text{об.изм}}^* = 2$. Результаты показаны на рис. 4. В обоих опытах для одноименных фаз времена оказались практически равными, что свидетельствовало о получении одинаковой остаточной индукции B_r^* . Остаточные индукции определялись следующим образом. Согласно рис. 4, для каждой фазы определялись времена $t_{\text{изм}}$, необходимые для получения $I_{\text{об.изм}}^* = 2$. Далее находились по выражению (2) соответствующие им приращения индукции $\Delta B_{\text{изм}^*}$. Затем по выражениям (12) при $I_{\text{об.изм}}^* = 2$ рассчитывались напряжённости магнитного поля H_* . Далее по зависимости $B_*(H_*)$ рис. 2, б определялись соответствующие им индукции $B_{\text{изм}^*}$. Остаточные индукции определялись по формуле

$$B_{r*} = B_{\text{изм}^*} - \Delta B_{\text{изм}^*}.$$

Найденные значения B_{r*} и B_r представлены в табл. 3. Они получились близкими к максимальному значению $B_{\text{ макс}^*} = 0,6$ или $B_{\text{ макс}} = 1$ Тл [3].

Для проверки предложенной методики были также проведены опыты по определению времени размагничивания $t_{\text{разм}}$ трансформаторов, выполненные в соответствии с [2].

Предварительно сначала для стержней фаз A, C, а затем и для стержня фазы B устанавливались

остаточные индукции B_r , равные нулю. После этого выставлялся ток

$$I_{\text{об.изм}^*} = I_{\text{об.изм}(1)^*} = 2.$$

Затем полярность подключения источника напряжения U_n менялась на противоположную. Очередная смена полярности производилась при

$$I_{\text{об.изм}(n+1)^*} = (-1)^n (0,3 \div 0,4) I_{\text{об.изм}(n)^*}, n = 1, 2, \dots, N.$$

Этот процесс продолжался до тех пор, пока при очередной N -й смене полярности ток в обмотке устанавливался на уровне

$$|I_{\text{об.изм}(N)^*}| \leq I'_{\text{нам380}^*},$$

где $I'_{\text{нам380}^*}$ – относительное действующее значение тока намагничивания при малом напряжении.

Выражение для расчёта времени $t_{\text{разм}}$, необходимого для размагничивания, можно получить, используя выражение (2):

$$t_{\text{разм}} = \frac{U_{\text{л.н}}}{222\sqrt{3}U_n} [2(\Delta B_{\text{изм}(1)^*} + \Delta B_{\text{изм}(2)^*} + \dots + \Delta B_{\text{изм}(N-1)^*}) + \Delta B_{\text{изм}(N)^*}].$$

В табл. 4 приведены данные для расчётного и опытного определения $t_{\text{разм}}$ для АТ типа АТДЦН-200000/330/110 при $U_n = 12,6$ В. Для аналогичного трансформатора, у которого $I_{\text{XX}} = 1,2$ А (0,34%) и $I'_{\text{нам380}^*} = 0,02$ А, расчёт даёт для фаз A и C $t_{\text{разм}} = 281$ с, для фазы B $t_{\text{разм}} = 343$ с. Опыт для фаз A и C дал $t_{\text{разм}} = 270$ с, а для фазы B $t_{\text{разм}} = 330$ с.

При практических измерениях ток $I_{\text{об.изм}^*}$ выбирают таким, чтобы магнитопровод вышел на пологий участок кривой $B_*(H_*)$ рис. 2, б, что соответствует условию $H_* > 1$. Это приводит к резкому уменьшению индуктивности измеряемой обмотки и повышению скорости изменения $i_{\text{об}}$, что необходимо для более точной работы регулятора тока.

При $H_* > 1$ величина B_* изменяется слабо и приближается к значению 1,1. Из выражения (12) видно, что условие $H_* > 1$ для всех фаз трансформатора выполняется при $I_{\text{об.изм}^*} > 1,67$. Если принять $I_{\text{об.изм}^*} = 2$ в качестве рекомендуемого значения, то с учётом сказанного можно предложить простое выражение для оценочных расчётов $t_{\text{изм}}$ при $B_{r*} = 0$

Таблица 3

Определение максимальных относительных значений остаточной индукции

Фаза	$t_{\text{изм}}$, с	$\Delta B_{\text{изм}^*}$	H_*	$B_{\text{изм}^*}$	B_{r*}	B_r , Тл
A и C	27	0,4	1,26	0,99	0,59	0,97
B	34	0,5	3,14	1,05	0,55	0,91

Таблица 4

Данные о суммарном приращении индукции при размагничивании стержней магнитопровода у автотрансформатора для расчёта времени размагничивания

n	$I_{\text{об.изм}(n)}$, А	$I_{\text{об.изм}(n)*}$	Фазы A и C		Фаза B	
			H_*	B_*	B_*	H_*
1	3	2	1,26	0,99	1,05	3,14
2	-1,2	-0,8	-0,48	-0,83	-0,91	-0,72
3	0,4	0,27	0,16	0,4	0,65	0,24
4	-0,15	-0,1	-0,06	-0,07	-0,1	-0,09
5	0,05	0,033	0,02	0,03	0,04	0,03
6	-0,02	-0,013	-0,008	-0,01	-0,013	-0,012

Примечания: 1. Для фаз A и C время размагничивания, полученное расчётом, равно 317 с, а опытным путём 283 с; для фазы B расчётное $t_{\text{разм}} = 375$ с, полученное на основе опыта $t_{\text{разм}} = 360$ с. 2. Рассматривался автотрансформатор типа АТДЦТН-200000/330/110 при $I_{\text{XX}} = 1,5$ А ($I_{\text{XX}} = 0,42\%$), $I_{\text{нам}380} = 0,025$ А.

$$t_{\text{изм}} \approx \frac{1,1}{222\sqrt{3}} \frac{U_{\text{л.н}}}{U_{\text{п}}}.$$

В приведённом выражении $t_{\text{изм}}$ рассчитывается в секундах, а $U_{\text{л.н}}$ и $U_{\text{п}}$ подставляются в вольтах.

Выводы

1. У трёхфазных трансформаторов время, необходимое для выхода на режим измерения сопротивления обмоток постоянному току, расположенных на крайних стержнях, меньше аналогичного времени для обмотки на среднем стержне.

2. У силовых трансформаторов время выхода на режим измерения сопротивления обмоток пропорционально отношению их номинального напряжения к напряжению на обмотке от источника питания измерительного прибора. При прочих равных условиях измерительный прибор с наибольшим напряжением питания имеет преимущество по затратам времени.

Список литературы

1. Объём и нормы испытаний электрооборудования [Текст]: РД34.45-51.300-97 / под общей ред. Б. А. Алексеева,

Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца. — 6-е изд. — М.: НЦ ЭНАС, 1998. — 256 с.

2. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний [Текст]: ГОСТ 3484.1-88. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. — 40 с.
3. Дроздов, А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными элементами в релейной защите [Текст] / А. Д. Дроздов, А. С. Засыпкин, С. Л. Кужеков, В. В. Платонов, Э. В. Подгорный; под ред. В. В. Платонова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 256 с.
4. Засыпкин, А. С. Релейная защита трансформаторов [Текст] / А. С. Засыпкин. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 240 с.
5. Зихерман, М. Х. Об остаточных индукциях в трансформаторах 330—750 кВ [Текст] / М. Х. Зихерман, И. П. Каменева // Электричество. — 1972. — № 5. — С. 86—88.
6. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов [Текст]: учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.
7. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия [Текст]: ГОСТ 21427.1-83. — М.: Издательство стандартов, 1992. — 17 с.
8. Молотилов, Б. В. Холоднокатаные электротехнические стали: Справочник [Текст] / Б. В. Молотилов [и др.]; под ред. Б. В. Молотилова. — М.: Металлургия, 1989. — 168 с.
9. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л. В. Лейтес. — М.: Энергия, 1981. — 392 с.