

УДК 621.314.2

В. М. Лагутин, к. т. н., доц.; В. В. Тептя, к. т. н.; В. В. Нетребский, к. т. н.**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В работе проведен анализ методов выявления короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов тока. Предложен метод определения короткозамкнутых витков, который отличается от известных методов большей эффективностью и надежностью и может быть рекомендован к использованию в эксплуатации.

Ключевые слова: трансформатор тока, витковое замыкание, коэффициент трансформации, напряжение, ток намагничивания.

Введение

В процессе эксплуатации во вторичных обмотках трансформаторов тока, которые используются для измерения токов в цепях учета электроэнергии, релейной защиты и автоматики, довольно часто возникают витковые замыкания. Это приводит к значительным погрешностям в измерении токов и неправильной работе устройств релейной защиты и автоматики, поэтому во время эксплуатации, согласно ПУЭ, трансформаторы тока ежегодно проверяют на наличие короткозамкнутых витков.

Согласно нормативным материалам, технические трансформаторы тока (ТТ), предназначенные для питания измерительных приборов, относительно допустимых погрешностей подразделяют на классы точности 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 и 10. Класс точности равен допустимой токовой погрешности при кратности первичного тока, равной единице, при условии, что $\cos \varphi_n = 0,8$, а величина сопротивления нагрузки находится в пределах $(0,25 \div 1,0) \cdot Z_{н.ном}$ для трансформаторов тока класса 0,2; 0,5 и 1,0 и в пределах $(0,5 \div 1,0) \cdot Z_{н.ном}$ для трансформаторов тока класса 3,0 и 10, где $Z_{н.ном}$ – номинальное сопротивление нагрузки [1, 6].

В схемах релейной защиты часто приходится учитывать возможность значительного искажения формы кривой тока подмагничивания и вторичного тока.

Как известно, реле защиты переменного тока градуируют и проверяют, как правило, при синусоидальном токе, при чем условия срабатывания и несрабатывания характеризуются действующими значениями последнего. Если форма кривой нарушается, то действующее значение искаженного по форме тока достаточно характеризует поведение только в тех реле, для которых действующее значение тока является параметром реагирования (например, электромагнитные реле). Если параметром реагирования является, например, среднее выпрямленное значение тока $I_{св}$, то действующее значение искаженного по форме тока уже не характеризует поведение реле. В данном случае действие реле характеризуется некоторым условным током, равным $1,11 \cdot I_{св}$, где 1,11 – коэффициент формы кривой синусоидального тока, при котором проверяли реле. Если реле, реагирующее на среднее выпрямленное значение тока, срабатывает при действующем значении синусоидального тока, который равен $I_{р.с}$, то при искаженной форме кривой тока оно будет срабатывать при действующем значении тока:

$$I'_{р.с} = I_{р.с} \cdot K_{\phi} / 1,11,$$

где K_{ϕ} – коэффициент формы кривой искажения тока.

Таким образом, в зависимости от характера искажения тока (от величины K_ϕ) реле может быть более или менее чувствительным к действующему значению тока.

Аналогично, если реле реагирует на амплитуду тока, то у него действующее значение тока срабатывания:

$$I'_{p.c} = \sqrt{2} \cdot I_{p.c} / K_a,$$

где K_a – коэффициент амплитуды тока.

Точность трансформации тока в переходных процессах КЗ существенно влияет на устойчивость функционирования устройств релейной защиты, особенно в сетях 220 кВ и выше, когда требуется быстрое отключение КЗ. Необходимо иметь в виду, что при постоянной времени первичной сети $T_a > 0,03 \div 0,05$ с (сети 110 кВ и выше, а иногда и более низких напряжений) ТТ с замкнутым магнитопроводом в переходных процессах часто насыщаются, что приводит к значительным погрешностям. Поскольку такие ТТ наиболее широко распространены, то измерительные органы быстродействующих устройств релейной защиты должны быть выполнены таким образом, чтобы искажения формы вторичного тока не приводили к нарушению функционирования защиты.

Согласно рекомендациям МЭК, трансформаторы тока, предназначенные для питания быстродействующих устройств релейной защиты, делят на три класса и обозначают так:

а) ТРХ – трансформатор тока, имеющий кольцевой магнитопровод, способный точно передавать во вторичную цепь как переменную, так и постоянную составляющие, пропорциональные первичному току;

б) ТРУ – трансформатор тока с малым немагнитным зазором для устранения остаточной индукции;

в) ТРЗ – трансформатор тока с немагнитными зазорами и линейной характеристикой на всем диапазоне изменения токов.

Трансформаторы тока типа ТРЗ обеспечивают точную трансформацию только периодической составляющей тока КЗ. В соответствии с назначением, ТТ соответствующего класса регламентируются требованиями точности в переходных процессах. Требования точности по активной нагрузке, которая создает наибольшие погрешности, нормируются следующим образом [2]:

- для трансформаторов тока класса ТРХ погрешность по максимуму мгновенного значения тока намагничивания не должна превышать 5% амплитуды номинального вторичного симметричного тока КЗ, а погрешность по переходу тока через нулевое значение – 3% в течение любого периода процесса КЗ, для которого регламентируется точность;

- для трансформаторов тока класса ТРУ погрешности определяются аналогично трансформаторам класса ТРХ и составляют соответственно 7,5% и 4,5%;

- для трансформаторов тока класса ТРЗ нормируется погрешность трансформации периодической составляющей тока КЗ, периодическая составляющая тока намагничивания не должна превышать 10% периодической составляющей вторичного тока.

Расчет погрешностей трансформаторов тока осуществляют методом наклоненной характеристики намагничивания (НХН) для ТТ с номинальной активной нагрузкой от 2,5 до 15 Вт.

Для выявления короткозамкнутых витков во вторичных обмотках трансформаторов тока (ТТ) используют следующие методы [3]:

- снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) трансформатора тока;
- измерение тока намагничивания в заводской контрольной точке;
- измерение коэффициента трансформации ТС при включении во вторичную обмотку сопротивления;
- использование прибора типа ВАФ-85М.

А. Снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) трансформатора тока

ВАХ ТТ представляет собой зависимость напряжения вторичной обмотки от тока намагничивания $I'_{2\text{нам}}$, то есть $U_2 = f(I'_{2\text{нам}})$. По снижению ВАХ и изменению ее крутизны определяют наиболее распространенное и опасное повреждение – витковое замыкание во вторичной обмотке.

При снятии ВАХ на испытываемую вторичную обмотку при разомкнутой первичной обмотке подают переменное регулируемое напряжение и измеряют ток, проходящий по обмотке (рис. 1).

При испытании одной из вторичных обмоток все остальные вторичные обмотки данного ТТ должны быть замкнуты. При проверках необходимо использовать испытательную схему с регулированием напряжения автотрансформатором (АТ), которая обеспечивает наименьшее искажение формы кривой напряжения.

Схема с использованием одного АТ типа ЛАТР-2 обеспечивает диапазоны регулирования от 0 до 250 В, а схема с использованием двух ЛАТР-2 позволяет получить регулировочное напряжение до 450 В. Согласно нормативным требованиям [4], при проверке ВАХ напряжение на вторичной обмотке не должно превышать 1800 В.

Измерение напряжения U_2 необходимо выполнять вольтметром, измеряющим среднее значение, показатели вольтметра в этом случае нужно умножить на коэффициент 1,11. Допускается использовать для измерений вольтметр, показания которого пропорциональны среднему значению напряжения, а шкала проградуирована в действующих значениях синусоидальной кривой. В этом случае умножение показателей вольтметра на коэффициент 1,11 не требуется. Измерение тока намагничивания необходимо осуществлять амперметром действующего значения.

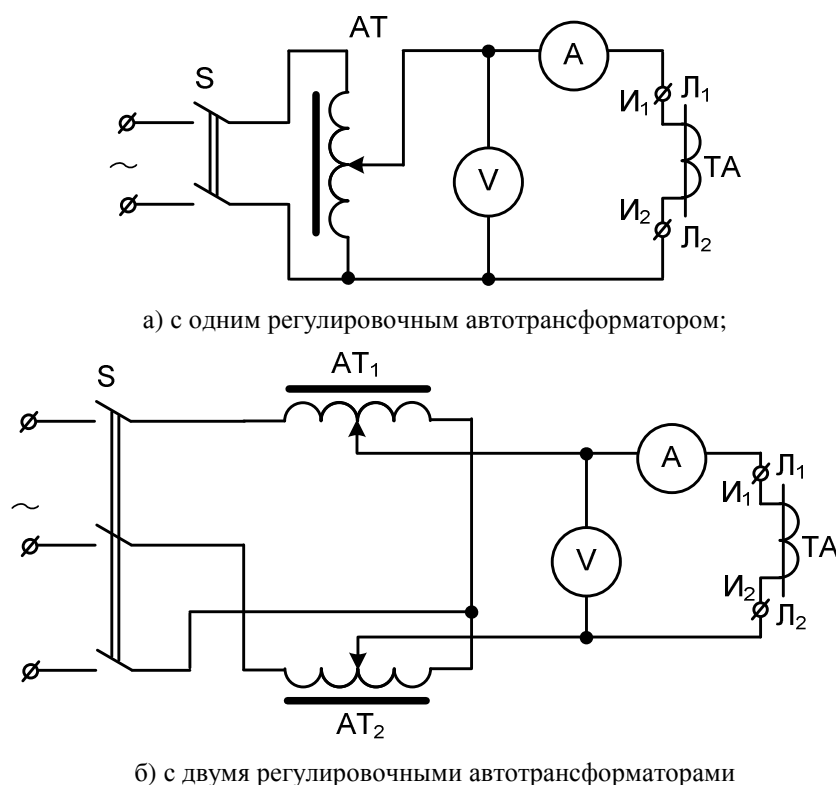


Рис. 1. Схема снятия ВАХ трансформатора тока

Для ТТ, имеющих собственную первичную обмотку, допускается измерение напряжения U_1 производить на зажимах первичной обмотки и пересчитывать ее на напряжение

Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

вторичной обмотки по формуле:

$$U_2 = 1,11 \cdot U_1 \cdot \omega_1 / \omega_2 ,$$

где ω_1 , ω_2 – число витков первичной и вторичной обмоток ТТ.

Для каскадных ТТ измерение тока намагничивания осуществляют отдельно для каждой ступени.

Оценку исправности ТТ при полном включении осуществляют, как правило, сопоставлением ВАХ всех трансформаторов данного типа с одинаковыми коэффициентами трансформации (n_c). Если одна из характеристик расположена значительно ниже других (на 50% и более), это указывает на наличие в трансформаторе тока виткового замыкания; если разница составляет 25 – 40%, то необходимо сравнить ВАХ ТТ с типовой и провести некоторые дополнительные проверки, которые позволяют с большой вероятностью выявить наличие короткозамкнутых витков.

Дополнительные проверки для трансформаторов тока с самой низкой ВАХ, если есть подозрения в наличии виткового замыкания, необходимо обязательно проводить, сравнивая с результатами аналогичных проверок на исправном ТТ. На рис. 2 приведены ВАХ трансформаторов тока типа ТПШФ и ТВ [5].

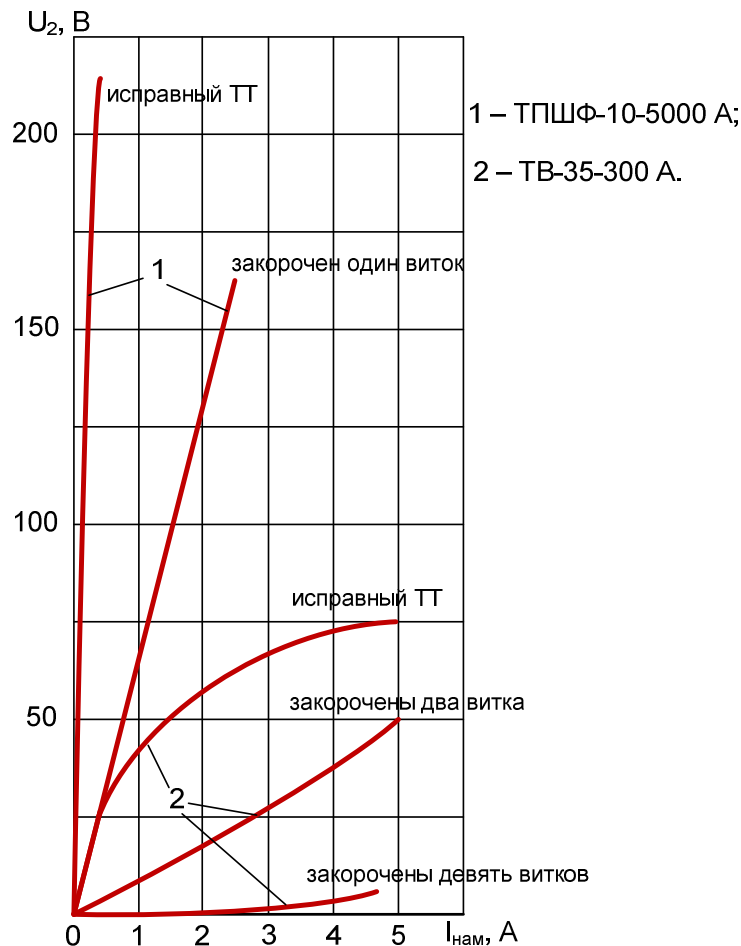


Рис. 2. Характеристика намагничивания трансформаторов тока при витковых замыканиях во вторичных обмотках

Б. Измерение тока намагничивания в заводской контрольной точке

Заводы-производители в паспорте трансформаторов тока указывают значения U_2 и $I'_{2нама}$ для контрольных измерений при полном включении, но пока нет достаточного опыта,

позволяющего оценить эффективность обнаружения витковых замыканий измерением тока намагничивания в заводской контрольной точке (табл. 1) [1].

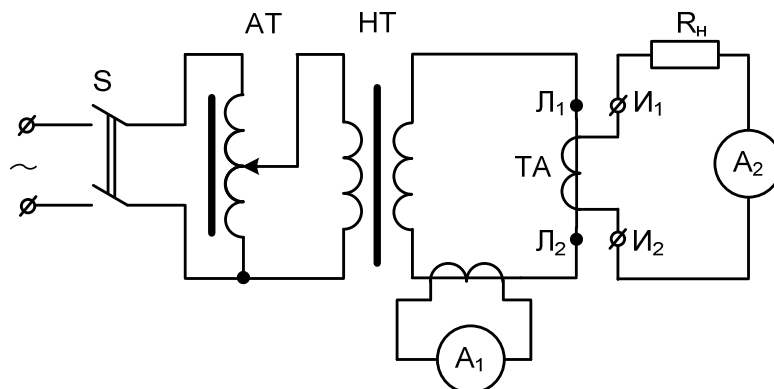
Таблица 1

Данные для проверки трансформаторов тока по заводским контрольным точкам

Тип ТТ	Проверяемая вторичная обмотка	Номинальный первичный ток, А	Контрольное напряжение, В		Ток намагничивания, мА	
			$I_{2ном} = 1 \text{ А}$	$I_{2ном} = 5 \text{ А}$	$I_{2ном} = 1 \text{ А}$	$I_{2ном} = 5 \text{ А}$
ТФЗМ 35Б-ПУ1	Все	500	–	195	–	524
		1000	–	195	–	524
		2000	961	225	110	136
		3000	1100	245	44	134
ТФЗМ 110Б-ПУ1	Все	1500	838	180	84	464
		2000	879	218	54	324
ТФЗМ 150Б-ПУ1	2И ₁ –2И ₂	1000, 2000	1635	378	89	980
	3И ₁ –3И ₂ ; 4И ₁ –4И ₂	–	1362	315	52	360
ТФЗМ 220Б-ШУ1	2И ₁ –2И ₂ ; 3И ₁ –3И ₂	300–1200	900	173	112	548
	4И ₁ –4И ₂	–	319	76	44	266
ТФЗМ 500Б-IVУ1: нижняя степень верхняя степень	Все					
		5	1347	–	132	–
		1000, 2000	–	2303	–	368

В. Измерение коэффициента трансформации ТТ при включении во вторичную обмотку сопротивления

Измерение коэффициента трансформации n_T первичным током осуществляют при включении во вторичную цепь трансформатора тока резистора $R_n = (10 \div 30) \cdot Z_{ном}$ (рис. 3). У исправных трансформаторов тока значение n_T изменяется незначительно, а при наличии виткового замыкания значение вторичного тока уменьшается, а n_T увеличивается. Так, при проверке встроенного ТТ с коэффициентами трансформации, равными 2000/5, 1500/5 и 750/5, на ответвлениях И1-И2 при $R_n = 1,0; 10; 20; 30 \text{ Ом}$ ($Z_{ном} = 1 \text{ Ом}$) при одном замкнутом витке получены соответственно значения $n_T = 150; 172; 220$ и 250 ; у исправных ТТ коэффициент трансформации увеличился незначительно.

Рис. 3. Проверка коэффициента трансформации n_T при различных значениях сопротивления $Z_{ном}$

Г. Использование прибора типа ВАФ-85М

При использовании прибора ВАФ-85М измеряют угол между напряжением U_2 и током намагничивания $I'_{2нам}$; в исправных трансформаторах тока в линейной части ВАХ напряжение опережает ток намагничивания $I'_{2нам}$ на угол $30 \div 50^\circ$, а по мере насыщения угол достигает 90° . При наличии виткового замыкания угол опережения при тех же значениях тока значительно меньше, а его увеличение наблюдают при больших значениях тока намагничивания.

Анализ методов обнаружения короткозамкнутых витков в ТТ свидетельствует, что все они являются трудоемкими, требуют проведения многих опытов и длительной обработки их результатов, то есть не являются удобными в условиях эксплуатации, поэтому желательно иметь более простые методы обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках ТТ. Таким может быть метод, не требующий больших усилий от эксплуатационного персонала предприятий электрических систем и обеспечивающий надежные результаты по выявлению неисправных ТТ.

Суть метода заключается в том, что по первичной обмотке пропускают ток, а на вторичной обмотке измеряют напряжение, пропорциональное магнитному потоку (рис. 4). При наличии короткозамкнутых витков ток, протекающий по ним, создает встречный магнитный поток, в результате чего напряжение на разомкнутых концах вторичной обмотки резко снижается по сравнению с исправным ТТ. В таблице 2 приведены экспериментальные данные для трансформаторов тока типа ТПЛ-10УЗ.

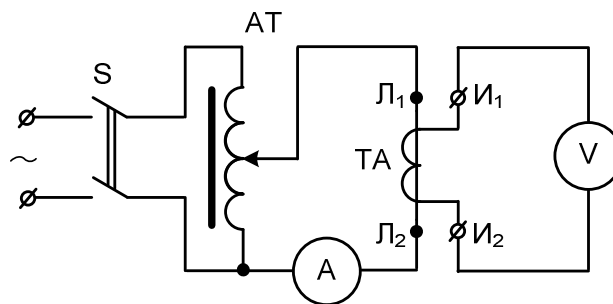


Рис. 4. Схема для определения короткозамкнутых витков у ТТ

Таблица 2

Экспериментальные данные по выявлению короткозамкнутых витков во вторичных обмотках трансформатора тока типа ТПЛ-10УЗ

Трансформатор тока	Коэффициент трансформации	Класс точности обмотки	I , А	U , В	Наличие короткозамкнутых витков
ТПЛ-10УЗ	150/5	Р	2,5	16	нет
			2,5	2,5	1
			2,5	1,3	2
		0,5	2,5	10	нет
			2,5	2,5	1
			2,5	2,5	1
	50/5	Р	2,5	18	нет
			2,5	5,8	1
		0,5	2,5	12	нет
			2,5	5,6	1

Анализ экспериментальных данных для трансформаторов тока, которые испытывают, свидетельствует, что, действительно, при наличии короткозамкнутых витков во вторичных обмотках ТТ напряжение на разомкнутых их концах резко снижается.

Выводы

Таким образом, предложенный метод определения короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов тока отличается от известных методов большей эффективностью и надежностью и может быть рекомендован для использования в эксплуатации.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казанский В. Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты / В. Е. Казанский. – М. : Энергия, 1969. – 184 с.
2. Королев Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. – М. : Энергия, 1980. – 208 с.
3. Справочник по наладке электрооборудования электростанций и подстанций / [под. ред. Э. С. Мусаэляна]. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 344 с.
4. Норми випробування електрообладнання : СОУ-Н ЕЕ 20.302:2009. – Офіц. вид. – К. : М-во палива та енергетики України, 2009. – 276 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
5. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / [под. ред. Н. С. Мовсесова, А. М. Храмушина]. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 480 с.
6. Трансформаторы тока / [В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, Л. В. Жалалис и др.]. – Л. : Энергия, 1980. – 344 с.

Лагутин Валерий Михайлович – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245.

Тептя Вера Владимировна – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245, e-mail: TVV75@list.ru.

Нетребский Владимир Васильевич – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245.

Винницкий национальный технический университет.