

УДК 621.314.2

**В. М. Лагутін, к. т. н., доц.; В. В. Тептя, к. т. н.; В. В. Нетребський, к. т. н.****УДОСКОНАЛЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ВИМІРЮВАЛЬНИХ  
ТРАНСФОРМАТОРІВ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

*У роботі проведено аналіз методів виявлення короткозамкнених витків в обмотках трансформаторів струму. Запропоновано метод визначення короткозамкнених витків, який відрізняється від відомих методів більшою ефективністю та надійністю й може бути рекомендований до використання в експлуатації.*

**Ключові слова:** трансформатор струму, виткове замикання, коефіцієнт трансформації, напруга, струм намагнічування.

**Вступ**

У процесі експлуатації у вторинних обмотках трансформаторів струму, які використовують для вимірювання струмів у колах обліку електроенергії, релейного захисту та автоматики, досить часто виникають виткові замикання. Це призводить до значних похибок у вимірюванні струмів і неправильної роботи пристроїв релейного захисту й автоматики, тому під час експлуатації, згідно з ПУЕ, трансформатори струму щорічно перевіряють на наявність короткозамкнених витків.

Згідно з нормативними матеріалами, технічні трансформатори струму (ТС), призначені для живлення вимірювальних приладів, відносно допустимих похибок поділяють на класи точності 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 та 10. Клас точності дорівнює допустимій струмовій похибці за кратності первинного струму, яка дорівнює одиниці, за умови, що  $\cos \varphi_n = 0,8$ , а величина опору навантаження в межах  $(0,25 \div 1,0) \cdot Z_{н.ном}$  для трансформаторів струму класу 0,2; 0,5 і 1,0 та в межах  $(0,5 \div 1,0) \cdot Z_{н.ном}$  для трансформаторів струму класу 3,0 і 10, де  $Z_{н.ном}$  – це номінальний опір навантаження [1, 6].

У схемах релейного захисту часто доводиться враховувати можливість значного викривлення форми кривої струму підмагнічування та вторинного струму.

Як відомо, реле захисту змінного струму градуують та перевіряють, як правило, за синусоїдного струму, при чому умови спрацювання та неспрацювання характеризують діючими значеннями останнього. Якщо форма кривої порушується, то діюче значення викривленого за формою струму достатньо характеризує поведінку тільки в тих реле, для яких діюче значення струму є параметром реагування (наприклад, електромагнітні реле). Якщо параметром реагування є, наприклад, середнє випрямлене значення струму  $I_{св}$ , то діюче значення викривленого за формою струму вже не характеризує поведінку реле. У цьому випадку дія реле характеризується деяким умовним струмом, який дорівнює  $1,11 \cdot I_{св}$ , де 1,11 – коефіцієнт форми кривої синусоїдного струму, за якого перевіряли реле. Якщо реле, яке реагує на середнє випрямлене значення струму, спрацює за діючого значення синусоїдного струму, який дорівнює  $I_{р.с}$ , то за викривленої форми кривої струму воно буде спрацювати за діючого значення струму:

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

де  $K_{\phi}$  – коефіцієнт форми кривої викривлення струму.

Отже, залежно від характеру викривлення струму (від величини  $K_{\phi}$ ) реле може бути більше або менше чутливим до діючого значення струму.

Аналогічно, якщо реле реагує на амплітуду струму, то в нього діюче значення струму спрацювання:

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

де  $K_a$  – коефіцієнт амплітуди струму.

Точність трансформації струму в перехідних процесах КЗ суттєво впливає на стійкість функціонування пристроїв релейного захисту, особливо в мережах 220 кВ та вище, коли потрібне швидке вимикання КЗ.

Необхідно мати на увазі, що за постійній часу первинної мережі  $T_a > 0,03 \div 0,05$  с (мережі 110 кВ та вище, а іноді й більш низьких напруг) ТС із замкненим магнітопроводом у перехідних процесах часто насичуються, що призводить до значних похибок. Оскільки такі ТС найбільш широко розповсюджені, то вимірювальні органи швидкодійних пристроїв релейного захисту повинні бути виконані таким чином, щоб викривлення форми вторинного струму не призводили до порушення функціонування захисту.

Відповідно до рекомендацій МЕК, трансформатори струму, призначені для живлення швидкодійних пристроїв релейного захисту, поділяють на три класи та позначаються так:

а) ТРХ – трансформатор струму, який має кільцевий магнітопровід, здатний точно передавати у вторинне коло як змінний, так і постійний складники, пропорційні первинному струму;

б) ТРҮ – трансформатор струму з малим немагнітним зазором для усунення залишкової індукції;

в) ТРЗ – трансформатор струму з немагнітними зазорами та лінійною характеристикою на всьому діапазоні зміни струмів.

Трансформатори струму типу ТРЗ забезпечують точну трансформацію тільки періодичного складника струму КЗ. Згідно з призначенням, ТС відповідного класу регламентуються вимоги точності в перехідних процесах. Вимоги точності за активного навантаження, яке створює найбільші похибки, нормують так [2]:

- для трансформаторів струму класу ТРХ похибка за максимумом миттєвого значення струму намагнічування не повинна перевищувати 5% амплітуди номінального вторинного симетричного струму КЗ, а похибка по переходу струму через нульове значення – 3% протягом будь-якого періоду процесу КЗ, для якого регламентується точність;
- для трансформаторів струму класу ТРҮ похибки визначають аналогічно трансформаторам класу ТРХ і складають відповідно 7,5% та 4,5%;
- для трансформаторів струму класу ТРЗ нормується похибка трансформації періодичного складника струму КЗ, періодичний складник струму намагнічування не повинен перевищувати 10% періодичного складника вторинного струму.

Розрахунок похибок трансформаторів струму здійснюють методом нахиленої характеристики намагнічування (НХН) для ТС з номінальним активним навантаженням від 2,5 до 15 Вт.

Для виявлення короткозамкнених витків у вторинних обмотках трансформаторів струму (ТС) використовують такі методи [3]:

- зняття вольт-амперної характеристики (ВАХ) трансформатора струму;
- вимірювання струму намагнічування в заводській контрольній точці;
- вимірювання коефіцієнта трансформації ТС за умови ввімкнення у вторинну обмотку опору;
- використання приладу типу ВАФ-85М.

### А. Зняття вольт-амперної характеристики (ВАХ) трансформатора струму

ВАХ ТС являє собою залежність напруги вторинної обмотки  $U_2$  від струму намагнічування  $I'_{2нам}$ , тобто  $U_2 = f(I'_{2нам})$ . За зниженням ВАХ та зміною її крутизни виявляють найбільш розповсюджене і небезпечніше пошкодження – виткове замикання у вторинній обмотці.

Під час зняття ВАХ на вторинну обмотку, що випробується, за розімкненої первинної обмотки подають змінну регульовану напругу та вимірюють струм, який проходить по обмотці (рис. 1).

Під час випробування однієї із вторинних обмоток усі інші вторинні обмотки цього ТС повинні бути замкнені. Під час перевірок необхідно використовувати випробувальну схему з регулюванням напруги автотрансформатором (АТ), яка забезпечує найменше викривлення форми кривої напруги.

Схема з використанням одного АТ типу ЛАТР-2 забезпечує діапазони регулювання від 0 до 250 В, а схема з використанням двох ЛАТР-2 дозволяє отримати регульовальну напругу до 450 В. Відповідно до нормативних вимог [4] під час перевірки ВАХ напруга на вторинній обмотці не повинна перевищувати 1800 В.

Вимірювання напруги  $U_2$  необхідно виконувати вольтметром, який вимірює середнє значення, показники вольтметра в цьому випадку потрібно помножити на коефіцієнт 1,11. Допускається використовувати для вимірювань вольтметр, показники якого пропорційні середньому значенню напруги, а шкала проградуєвана в діючих значеннях синусоїдної кривої. У цьому випадку множення показників вольтметра на коефіцієнт 1,11 не потрібне. Вимірювання струму намагнічування необхідно здійснювати амперметром діючого значення.

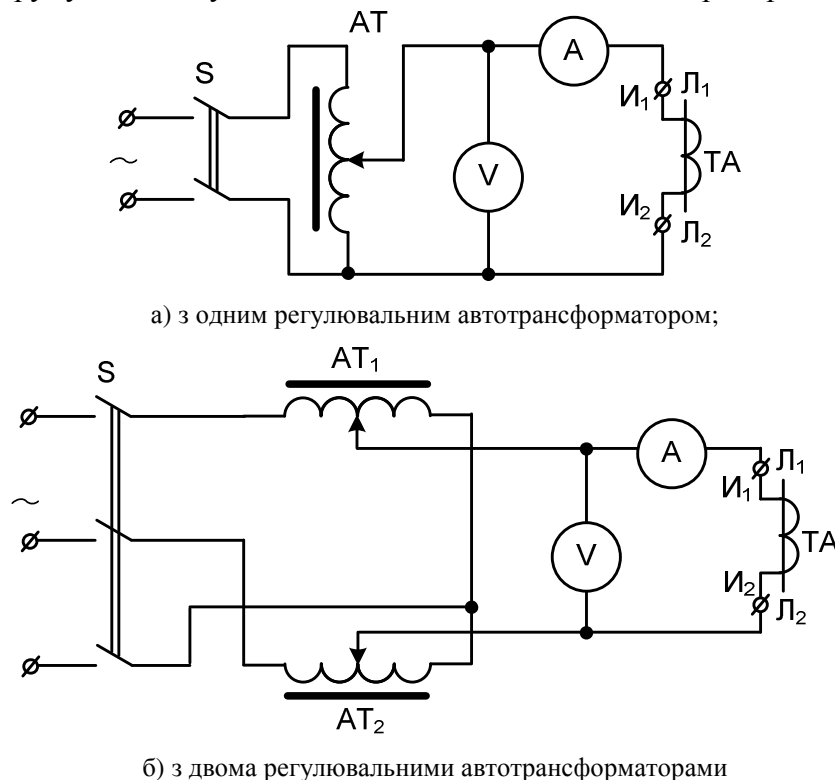


Рис. 1. Схема зняття ВАХ трансформатора струму

Для ТС, які мають власну первинну обмотку, допускається вимірювання напруги  $U_1$  здійснювати на затискачах первинної обмотки та перераховувати її на напругу вторинної обмотки  $U_2$  за формулою:

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

де  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – число витків первинної та вторинної обмоток ТС.

Для каскадних ТС вимірювання струму намагнічування здійснюють окремо для кожного ступеня.

Оцінювання справності ТС за повного ввімкнення здійснюють, як правило, зіставленням ВАХ усіх трансформаторів цього типу з однаковими коефіцієнтами трансформації ( $n_c$ ). Якщо одна з характеристик розташована значно нижче за інші (на 50% і більше), це вказує на наявність у трансформаторі струму виткового замикання; якщо різниця складає 25 – 40%, то необхідно порівняти ВАХ ТС із типовою та провести деякі додаткові перевірки, які дозволяють із великою ймовірністю виявити наявність короткозамкнених витків.

Додаткові перевірки для ТС із найнижчою ВАХ, якщо є підозри в наявності виткового замикання, необхідно обов'язково проводити, порівнюючи з результатами аналогічних перевірок на справному ТС. На рис. 2 наведено ВАХ трансформаторів струму типу ТПШФ та ТВ [5].

### Б. Вимірювання струму намагнічування в заводській контрольній точці

Заводи-виробники в паспорті трансформаторів струму вказують значення  $U_2$  та  $I'_{2\text{нам}}$  для контрольних вимірювань під час повного ввімкнення, але поки що немає достатнього досвіду, який дозволяє оцінити ефективність виявлення виткових замикань вимірюванням струму намагнічування в заводській контрольній точці (табл. 1) [1].

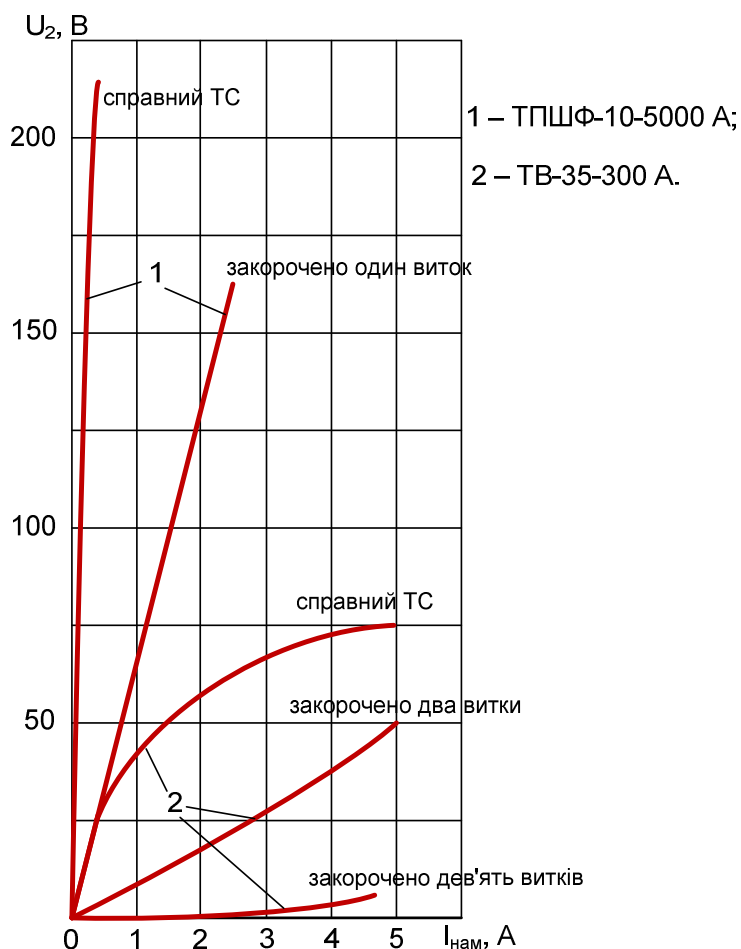


Рис. 2. Характеристика намагнічування трансформаторів струму під час виткових замикань у вторинних обмотках

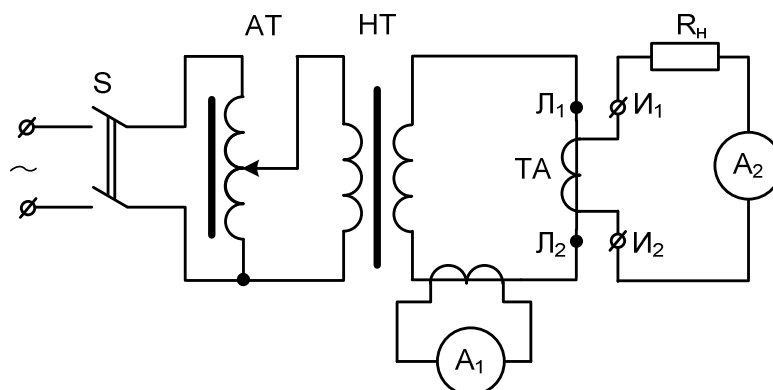
Таблиця 1

## Дані для перевірки трансформаторів струму за заводськими контрольними точками

Тип ТС	Вторинна обмотка, яку перевіряють	Номинальний первинний струм, А	Контрольна напруга, В		Струм намагнічування, мА	
			$I_{2ном} = 1 \text{ А}$	$I_{2ном} = 5 \text{ А}$	$I_{2ном} = 1 \text{ А}$	$I_{2ном} = 5 \text{ А}$
ТФЗМ 35Б-ШУ1	Всі	500	–	195	–	524
		1000	–	195	–	524
		2000	961	225	110	136
		3000	1100	245	44	134
ТФЗМ 110Б-ШУ1	Всі	1500	838	180	84	464
		2000	879	218	54	324
ТФЗМ 150Б-ШУ1	2И <sub>1</sub> –2И <sub>2</sub>	1000, 2000	1635	378	89	980
	3И <sub>1</sub> –3И <sub>2</sub> ; 4И <sub>1</sub> –4И <sub>2</sub>	–	1362	315	52	360
ТФЗМ 220Б-ШУ1	2И <sub>1</sub> –2И <sub>2</sub> ; 3И <sub>1</sub> –3И <sub>2</sub>	300–1200	900	173	112	548
	4И <sub>1</sub> –4И <sub>2</sub>	–	319	76	44	266
ТФЗМ 500Б-ШУ1: нижній ступінь верхній ступінь	Всі	5	1347	–	132	–
		1000, 2000	–	2303	–	368

### В. Вимірювання коефіцієнта трансформації ТС під час увімкнення у вторинну обмотку опору

Вимірювання коефіцієнта трансформації  $n_c$  первинним струмом здійснюють під час увімкнення у вторинне коло ТС резистора  $R_n = (10 \div 30) \cdot Z_{ном}$  (рис. 3). У справних трансформаторів струму значення  $n_c$  змінюється незначно, а за наявності виткового замикання значення вторинного струму зменшується, а  $n_c$  збільшується. Так, під час перевірки вбудованого ТС з коефіцієнтами трансформації, які дорівнювали 2000/5, 1500/5 та 750/5, на відгалуженнях И<sub>1</sub>–И<sub>2</sub> за  $R_n = 1,0; 10; 20; 30 \text{ Ом}$  ( $Z_{ном} = 1 \text{ Ом}$ ) при одному замкненому витку отримано відповідно значення  $n_c = 150; 172; 220$  та 250; у справних ТС коефіцієнт трансформації збільшився незначно.

Рис. 3. Перевірка коефіцієнта трансформації  $n_c$  за різних значень опору  $Z_{ном}$

### Г. Використання приладу типу ВАФ-85М

Під час використання приладу ВАФ-85М вимірюють кут між напругою  $U_2$  та струмом намагнічування  $I'_{2нам}$ ; у справних трансформаторах струму в лінійній частині ВАХ напруга  $U_2$  випереджає струм намагнічування  $I'_{2нам}$  на кут  $30 \div 50^\circ$ , а у міру насичення кут досягає  $90^\circ$ . За наявності виткового замикання кут випередження за тих самих значень струму значно менший, а його збільшення спостерігають за більших значень струму намагнічування.

Аналіз методів виявлення короткозамкнених витків у ТС свідчить, що всі вони є трудомісткими, вимагають проведення багатьох дослідів та тривалого оброблення їхніх результатів, тобто не є зручними в умовах експлуатації, тому бажано мати простіші методи виявлення короткозамкнених витків в обмотках ТС. Таким може бути метод, який не вимагає надмірних зусиль від експлуатаційного персоналу підприємств електричних систем та забезпечує надійні результати щодо виявлення несправних ТС.

Суть методу полягає в тому, що по первинній обмотці пропускають струм, а на вторинній обмотці вимірюють напругу, яка пропорційна магнітному потоку (рис. 4). За наявності короткозамкнених витків струм, який протікає по ним, створює зустрічний магнітний потік, у результаті чого напруга на розімкнених кінцях вторинної обмотки різко знижується порівняно зі справним ТС. У таблиці 2 наведено експериментальні дані для трансформаторів струму типу ТПЛ-10У3.

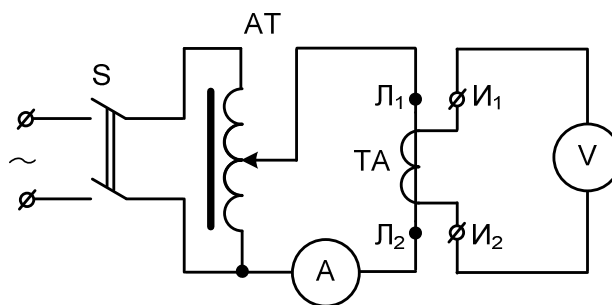


Рис. 4. Схема для визначення короткозамкнених витків у ТС

Таблиця 2

#### Експериментальні дані щодо виявлення короткозамкнених витків у вторинних обмотках трансформаторів струму типу ТПЛ-10У3

Трансформатор струму	Коефіцієнт трансформації	Клас точності обмотки	$I$ , А	$U$ , В	Наявність короткозамкнених витків
ТПЛ-10У3	150/5	Р	2,5	16	немає
			2,5	2,5	1
			2,5	1,3	2
		0,5	2,5	10	немає
	2,5		2,5	1	
	50/5	Р	2,5	18	немає
			2,5	5,8	1
		0,5	2,5	12	немає
2,5			5,6	1	

Аналіз експериментальних даних для трансформаторів струму, які випробують, свідчить, що, дійсно, за наявності короткозамкнених витків у вторинних обмотках ТС напруга на їхніх розімкнених кінцях різко знижується.

## Висновки

Отже, запропонований метод визначення короткозамкнених витків в обмотках трансформаторів струму відрізняється від відомих методів більшою ефективністю та надійністю й може бути рекомендований до використання в експлуатації.

## 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. Мусаэяна]. – 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.

**Лагутін Валерій Михайлович** – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245.

**Тептя Віра Володимирівна** – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245, e-mail: TVV75@list.ru.

**Нетребський Володимир Васильович** – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598-377, 598-245.

Вінницький національний технічний університет.