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 $cos\,\varphi_н = 0{,}8$, 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 градуюють 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, спрацьовує за діючого значення синусоїдного струму, який дорівнює $I_{р.с}$, то за викривленої форми кривої струму воно буде спрацьовувати за діючого значення струму:

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

де $K_ф$ – коефіцієнт форми кривої викривлення струму.

Отже, залежно від характеру викривлення струму (від величини $K_ф$) 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) TPX – трансформатор струму, який має кільцевий магнітопровід, здатний точно передавати у вторинне коло як змінний, так і постійний складники, пропорційні первинному струму;

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

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

Трансформатори струму типу TPZ 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 TPX 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 TPY похибки визначають аналогічно трансформаторам класу TPX і складають відповідно 7,5% та 4,5%;
- для трансформаторів струму класу TPZ 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

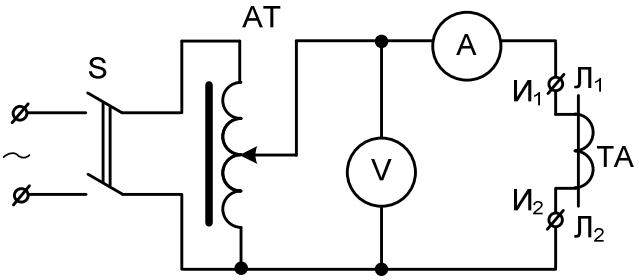
ВАХ ТС являє собою залежність напруги вторинної обмотки U_2 від струму намагнічування $I'_{2нам}$, тобто $U_2 = f(I'_{2нам})$. За зниженням ВАХ та зміною її крутизни виявляють найбільш розповсюджене і небезпечніше пошкодження – виткове замикання у вторинній обмотці.

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).

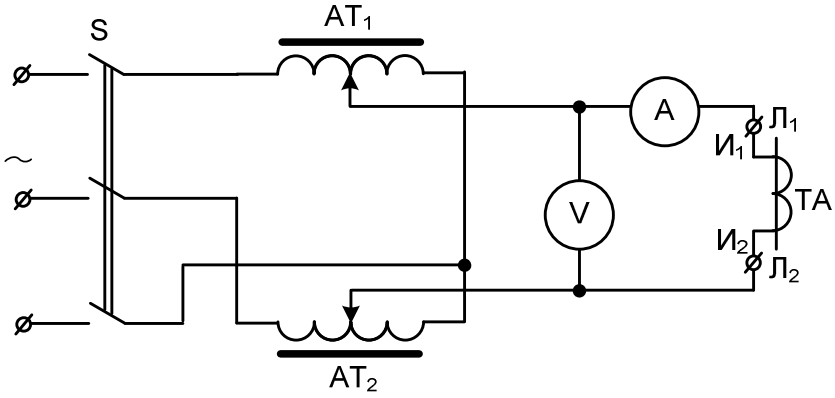
Під час випробування однієї із вторинних обмоток усі інші вторинні обмотки цього ТС повинні бути замкнені. Під час перевірок необхідно використовувати випробувальну схему з регулюванням напруги автотрансформатором (АТ), яка забезпечує найменше викривлення форми кривої напруги.

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 регулювальну 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 проградуйована 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.



а) з одним регулювальним автотрансформатором;



б) з двома регулювальними автотрансформаторами

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 ω_1, ω_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 $I'_{2нам}$ 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].

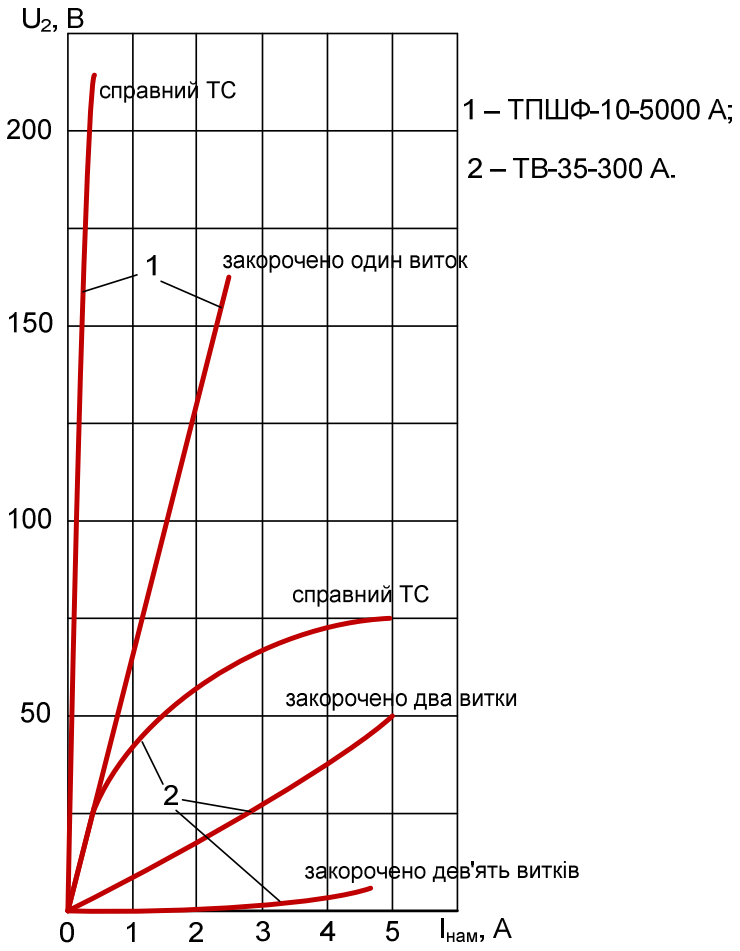


Рис. 2. Характеристика намагнічування трансформаторів струму під час виткових замикань у вторинних обмотках

Таблиця 1

Дані для перевірки трансформаторів струму за заводськими контрольними точками

Тип ТС	Вторинна обмотка, яку перевіряють	Номінальний первинний струм, А	Контрольна напруга, В		Струм намагнічування, mA	
			$I_{2ном}$ = 1 А	$I_{2ном}$ = 5 А	$I_{2ном}$ = 1 А	$I_{2ном}$ = 5 А
ТФЗМ 35Б-IIУ1	Всі	500	–	195	–	524
		1000	–	195	–	524
		2000	961	225	110	136
		3000	1100	245	44	134
ТФЗМ 110Б-IIУ1	Всі	1500	838	180	84	464
		2000	879	218	54	324
ТФЗМ 150Б-IIУ1	$2И_1$–$2И_2$	1000, 2000	1635	378	89	980
	$3И_1$–$3И_2$; $4И_1$–$4И_2$	–	1362	315	52	360
ТФЗМ 220Б-IIIУ1	$2И_1$–$2И_2$; $3И_1$–$3И_2$	300–1200	900	173	112	548
	$4И_1$–$4И_2$	–	319	76	44	266
ТФЗМ 500Б-IVУ1: нижній ступінь	Всі					
		5	1347	–	132	–
верхній ступінь		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 $R_н = (10 \div 30) \cdot Z_{ном}$ (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 $И_1$–$И_2$ за $R_н = 1{,}0$; 10; 20; 30 Ом ($Z_{ном}$ = 1 Ом) при одному замкненому витку отримано відповідно значення n_c = 150; 172; 220 та 250; у справних ТС коефіцієнт трансформації збільшився незначно.

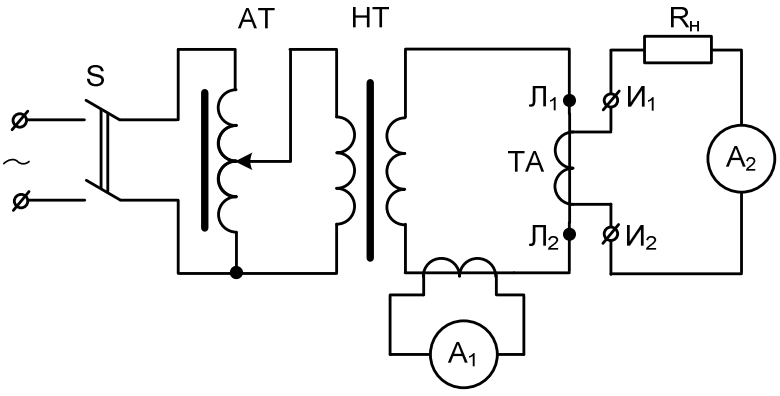


Рис. 3. Перевірка коефіцієнта трансформації n_c за різних значень опору $Z_{ном}$

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 $30 \div 50°$, а у міру насичення кут досягає $90°$. 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.

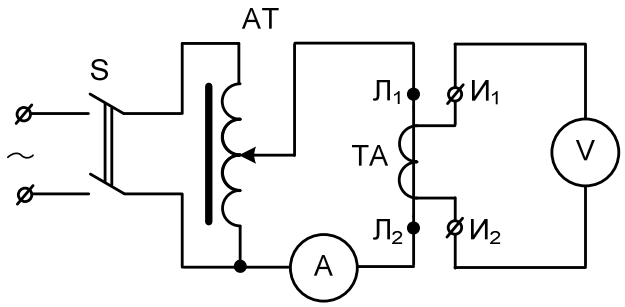


Рис. 4. Схема для визначення короткозамкнених витків у ТС

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. 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.

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.

V. M. Lagutin, Cand. Sc. (Eng.), Assist. Professor; V. V. Teptia, Cand. Sc. (Eng.); V. V. Netrebskiy, Cand. Sc. (Eng.)

IMPROVEMENT OF THE PROCEDURE OF INSTRUMENT TRANSFORMERS TESTING IN OPERATION CONDITIONS

The paper analyzes the methods of shading coils detecting in the windings of current transformers. Method of shading coils determination in the winding of current transformers is suggested. This method differs from already known methods by greater efficiency and reliability and may be recommended for application in practice.

Key words: *current transformer, turn short circuit, transformation ratio, voltage, magnetizing current.*

Introduction

In the process of operation turn short circuits rather frequently occur in secondary windings of current transformers, used for measurement of current in the circuits of electric energy account, relay protection and automation. This leads to considerable errors in the process of currents measurement and abnormal operation of relay protection and automatic devices. That is why, in the process of operation, in accordance with Rules of arrangement and operation, current transformers are annually tested on the subject of shading coils.

In accordance with the existing norms technical current transformers (CT), designed for supply of measuring instruments, relatively admissible errors are divided into the following classes of accuracy 0.2; 0.5; 1.0; 3.0 and 10. Accuracy class equals admissible current error at multiplicity of current ratio that equals one, on condition, that $cos\varphi_l = 0{,}8$ and the value of load impedance is within the limits $(0.25 \div 1.0) \cdot Z_{l.nom}$ for current transformers of accuracy class 0,2; 0,5 and 1,0 and within the limits $(0.5 \div 1.0) \cdot Z_{l.nom}$ for current transformers of accuracy class 3.0 and 10, where $Z_{l.nom}$ – nominal load impedance [1, 6].

In relay protection circuits the possibility of considerable bend of magnetizing current and secondary current curve must be taken into account.

As it is known alternating current protective relays are calibrated and controlled, as a rule, at sinusoidal current, conditions of operation and non-operation are characterized by the values of sinusoidal current. If the form of the curve is violated, then the acting value of the bent current sufficiently characterizes the behavior only in those relays, for which the acting value of the current is the response parameter (for instance, electromagnetic relays). If the response parameter is, for instance, mean rectification value of the current I_{mr}, then the acting value of the current, bent by the form of current, does not characterize the behavior of the relay. In the given case relay operation is characterized by certain conventional current, that equals $1.11 \cdot I_{m.r}$, where 1.11 – is the coefficient of the form of sinusoidal current curve, used for relay testing. If the relay, that responds to mean rectified value of the current, operates at the acting value of sinusoidal current, that equals $I_{p.c}$ then, in case of the bent form of current curve it will operate at the acting value of the current:

$$I'_{p.c} = I_{p.c} \cdot K_f / 1.11,$$

where K_f – coefficient of the form of current curve bent.

Thus, depending on the character of current bent (on the value K_f) the relay may be more or less sensitive to acting value of the current.

Similarly if the relays responds to current amplitude, then its acting value of operation current is:

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

where K_a – coefficient of current amplitude.

Accuracy of current transformation in transient process of short-circuiting (SC) influences considerably the stability of operation of relay protection devices, especially in the networks of 220 kV and higher, when rapid disconnection of SC is needed.

It should be taken into account that at constant of the primary network time $T_a > 0.03 \div 0.05$ with (network of 110 kV and higher, sometimes lower voltages) current transformers (CT) with close magnetic circuit in transient processes are often saturated, that leads to considerable errors As such CT are widely used, then measuring instruments of fast-acting relay protection devices must be realized in such a way that the bent form of the secondary current would not result in violation of protection system operation.

According to ICEE recommendations current transformers, intended for supply of fast-acting relay protection devices are divided into three classes and are denoted as:

a) TPX – current transformer, that has ring-type magnetic circuit, enabling to supply accurately in secondary circuit both alternating and direct components, that are proportional to primary current;

b) TPX – current transformer with small nonmagnetic gap for elimination of residual inductance;

c) TPZ – current transformer with nonmagnetic gaps and linear characteristic along the whole range of currents change.

TPZ current transformers provide accurate transformation of only periodic component of SC current. In accordance with the designation of CT of the corresponding class, accuracy requirements are regulated in transient processes. Accuracy requirements at active loading, that creates the greatest errors, are regulated in the following manner [2]:

- For TPX class current transformers the error by the maximum of instant value of magnetizing current must not exceed 5 % of the amplitude of nominal secondary symmetrical current of SC and the error by the transition of the current across zero value – 3 % during any period of SC process, for which accuracy is regulated;
- for TPY class current transformers errors are defined as for TPX class transformers and are 7.5% and 4.5% correspondingly;
- for TPZ current transformers transformation error of periodic component of SC current is standardized, periodic component of magnetizing current must not exceed 10 % of periodic component of the secondary current.

  Calculation of current transformers errors is carried out, applying the method of magnetization characteristic for CT with rated active load from 2.5 to 15 W.

To detect short-circuited turns in secondary windings of current transformers (CT) the following methods are used [3]:

- taking of voltage – current characteristic of current transformer;
- measuring of magnetizing current at plant control point;
- measuring of transformation ratio of CT while connecting with the resistance secondary winding;
- usage of ВАФ-85М type device.

A. Taking of voltage – current characteristic of current transformer

Voltage current characteristic of CT is the dependence of secondary winding voltage U_2 on

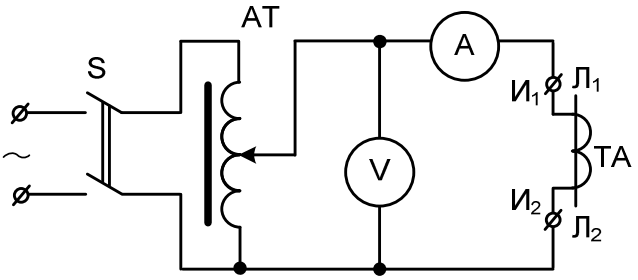
magnetizing current I'_{2mag}, i.e., $U_2 = f\left(I'_{2mag}\right)$. Drop of voltage – current characteristic and change of its slope shows widely spread and the most dangerous damage – turn short circuit in the secondary winding.

When voltage current characteristic is taken, variable regulated voltage is supplied to the secondary winding, being tested, at disconnected primary winding, and current, passing across the winding is measured (Fig 1).

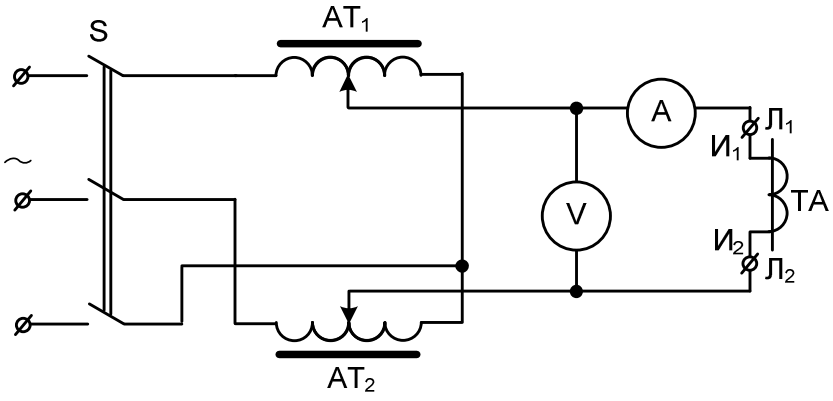
When one of the secondary windings is tested, all other secondary windings of the given CT must be closed. In the process control the test circuit with voltage regulation by means of autotransformer (AT), that provides the least bending of voltage curve form must be used.

The circuit, using one autotransformer of ЛАТР-2 type provides regulation range from 0 to 250 V, and the circuits with two ЛАТР-2 allows to obtain regulation voltage up to 450 V. In accordance with the norms [4], while VAC testing the voltage at the secondary windings must not exceed 1800 V.

Voltage U_2 measurement must be carried out by the voltmeter, that measures mean value, in this case, readings of the voltmeter must be multiplied by 1.11 factor. The voltmeter, readings of which are proportional to mean value of the voltage and the scale is calibrated in acting values of sinusoidal curve is accepted for usage. In this case, multiplication of voltmeter readings by the coefficient 1.11 is not needed. Measurement of magnetization current must be performed by the ammeter of acting value.



a) with one regulating autotransformer;



b) with two regulating transformers

Fig. 1. Scheme of taking voltage – current characteristics of current transformer

For CT, that have their own primary winding it is accepted to measure U_1 voltage at the terminals of the first winding and recalculate it into the voltage of the secondary winding U_2 by the formula:

$$U_2 = 1.11 \cdot U_1 \cdot \omega_1 / \omega_2,$$

where ω_1, ω_2 – number of turns in the primary and secondary windings of CT.

For cascade current transformers measurement of magnetizing current is carried out separately for each stage.

Evaluation of CT serviceability in case of complete connection is realized as a rule, by means of comparison of VAC of all transformers of the given type with the same transformation ratio (n_c). If one of the characteristics is located lower than the others (50 % and more), it shows that there is turn short circuiting in current transformer; if the difference is 25 – 40%, in this case, it is necessary to compare VAC of CT with typical characteristic and perform certain additional checking, that will allow with great probability to reveal the availability to short-circuited turns.

Additional inspections for CT with the lowest VAC, if there are suspicions regarding turn short-circuiting, must be done, comparing with the results of analog testing at serviceable current transformer (CT). Fig 2 shows VAC of current transformers of ТПШФ and ТВ types [5].

B. Measurement of magnetizing current in plant control point

Manufacturing plants in CT certificate indicate the values of U_2 and I'_{2mag} for control measurements at complete connection, but for the time being there is no sufficient experience, that allows to evaluate the efficiency of detecting turn short-circuiting by measuring magnetizing current at plant control point (Table 1) [1].

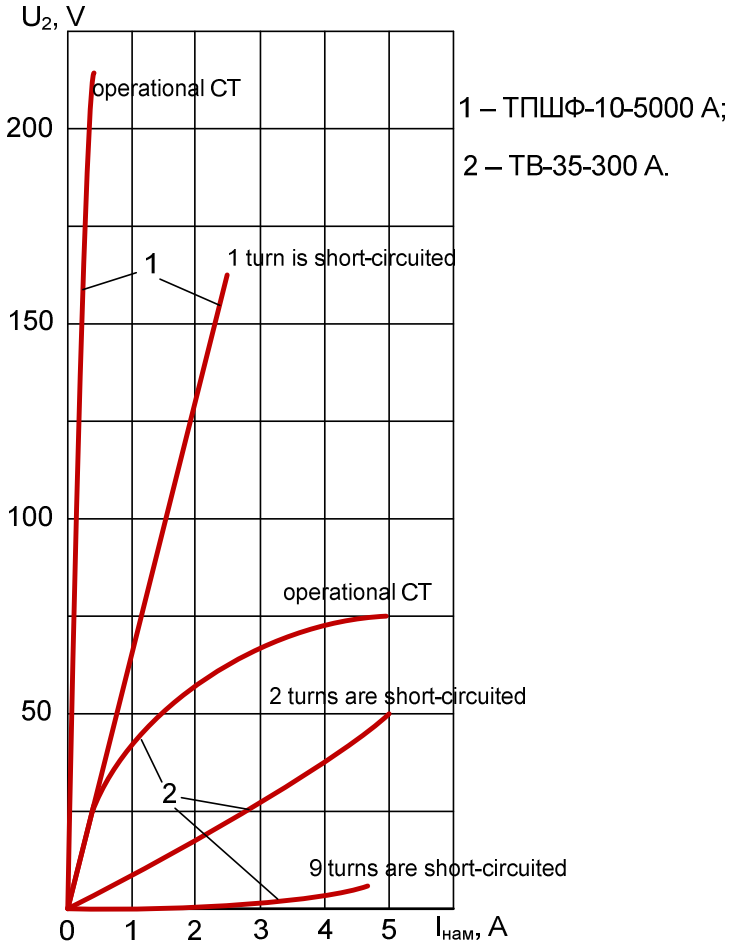


Fig. 2. Characteristic of current transformers magnetizing at turn short- circuiting in secondary windings

Table 1 – Data for current transformer checking according to plant control points

CT type	Secondary winding, being tested	Nominal primary current, A	Control voltage, V		Magnetizing current, mA	
			I_{2nom} = 1 A	I_{2nom} = 5 A	I_{2nom} = 1 A	I_{2nom} = 5 A
ТФЗМ 35Б-IIУ1	All	500	–	195	–	524
		1000	–	195	–	524
		2000	961	225	110	136
		3000	1100	245	44	134
ТФЗМ 110Б-IIУ1	All	1500	838	180	84	464
		2000	879	218	54	324
ТФЗМ 150Б-IIУ1	$2И_1$–$2И_2$	1000, 2000	1635	378	89	980
	$3И_1$–$3И_2$; $4И_1$–$4И_2$	–	1362	315	52	360
ТФЗМ 220Б-IIIУ1	$2И_1$–$2И_2$; $3И_1$–$3И_2$	300–1200	900	173	112	548
	$4И_1$–$4И_2$	–	319	76	44	266
ТФЗМ 500Б-IVУ1: low stage upper stage	All					
		5	1347	–	132	–
		1000, 2000	–	2303	–	368

C. Measurement of current transformer transformation ratio at connection of the resistance into the secondary winding

Measurement of transformation ratio n_c by primary current is realized, when the resistor $R_н = (10 \div 30) \cdot Z_{nom}$ of CT is connected into the secondary circuit (Fig 3). In operational current transformers value of n_c changes insignificantly and in case of turn short- circuiting the value of secondary current decreases and the value of n_c increases. In the process of testing of built-in CT with transformation ratios 2000/5, 1500/5 and 750/5 at taps $И_1$–$И_2$ at R_N =1,0; 10; 20; 30 Ohm ($Z_{ном}$ = 1 Ohm) at one short-circuited turn, corresponding values of n_c = 150; 172; 220 and 250 were obtained; in operational CT transformation ratio increased insignificantly.

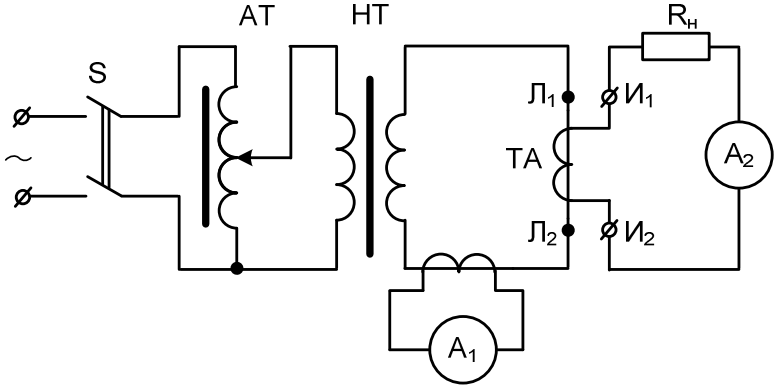


Fig. 3. Checking of transformation ratio n_c at different values of Z_{nom} resistance

D. Usage of ВАФ-85М – type device

ВАФ-85М device is used for measurement of the angle between voltage U_2 and magnetizing current I'_{2mag} ; in operational current transformers in linear section of VAC voltage U_2 leaves behind magnetizing current I'_{2mag} by the angle of $30 \div 50°$, and with saturation the angle reaches $90°$. In case of turn short circuiting the angle of lead at the same values of current is far smaller, and its increase is observed at greater values of magnetizing current.

Analysis of the method of short-circuited turns in CT detection proves that all they are labor

consuming, require performing numerous experiments and long processing of the results, that is, they are not convenient in operation conditions. That is why, it is desirable to have simpler methods of short-circuited turns detection in the windings of CT. One of them may be the method that does not require great efforts from operation staff of energy enterprises and provides reliable results, regarding the detection of faulty CT.

The essence of the method is that current is applied to primary winding, and voltage is measured at the secondary winding, that proportional to magnetic flux (Fig 4). If there are short-circuited turns current, that passes across these turns creates opposite magnetic flux, as a result the voltage at open terminals of secondary winding drastically drops as compared with operational CT. Table 2 contains the experimental data for current transformers of ТПЛ-10У3 type.

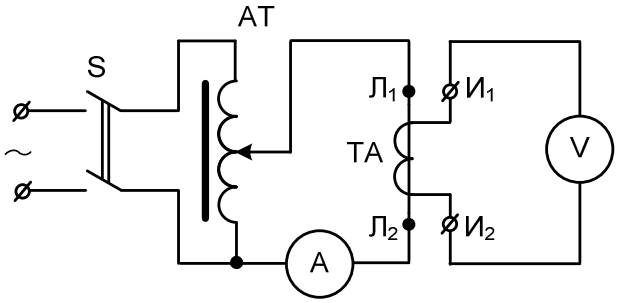


Fig. 4. Circuit for determining of short-circuited turns in CT

Table 2 – Experimental data regarding detection of short-circuited turns in secondary winding of ТПЛ-10У3 type current transformer

Current transformer	Transformation ratio	Accuracy class of the winding	I, A	U, B	Availability of short-circuited turns
ТПЛ-10У3	150/5	P	2,5	16	no
			2,5	2,5	1
			2,5	1,3	2
		0,5	2,5	10	no
			2,5	2,5	1
	50/5	P	2,5	18	no
			2,5	5,8	1
		0,5	2,5	12	no
			2,5	5,6	1

The analysis of experimental data for CT being tested, shows that in case of shot-circuited turns in secondary windings of CT the voltage at its open terminals drastically drops.

Conclusions

The suggested method of short-circuited turns determination in the windings of CT differs from the known methods by higher efficiency and reliability and may be recommended for usage in the process of operation.

REFERENCES

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.

Lagutin Valeriy – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor with the Chair of Electric Stations and Systems.

Teptia Vira – Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer with the Chair Electric Stations and Systems, e-mail: TVV75@list.ru

Netrebskiy Volodymyr – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor with the Chair of Electric Stations and Systems.

Vinnytsia National Technical University.