

А. В. Журахівський¹
Ю. А. Кенс¹
Р. Я. Ференсович¹

АНАЛІЗ РЕЖИМУ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ З РОЗІМКНЕНИМ ВТОРИННИМ КОЛОМ МЕТОДАМИ АНАЛІТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Проведено аналіз режимів роботи трансформаторів струму з розімкненими їх вторинними колами. Запропоновано використання методів аналітичних розрахунків рівнів напруг на розімкнених виводах вторинних обмоток трансформаторів струму з метою швидкого експрес-аналізу таких режимів роботи. Здійснено порівняльний аналіз результатів розрахунку амплітуд імпульсів напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора струму типу ТЛМ-10, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання його аварійного режиму роботи та аналітичного обчислення.

Ключові слова: трансформатор струму, вторинне коло, перенапруги, методи аналітичних розрахунків.

Вступ

Трансформатори струму виконують важливі функції у схемах вимірювань, релейного захисту та автоматики електроенергетичних систем. Їм доводиться працювати як в усталених, так і у перехідних режимах роботи електричних мереж, які характеризуються відповідними особливостями перебігу електромагнітних процесів.

Режим роботи трансформатора струму з розімкненим вторинним колом є аварійним і супроводжується зростанням магнітного потоку в магнітопроводі внаслідок зникнення розмагнічувальної магніторушійної сили вторинної обмотки. Це призводить до збільшення активних втрат у магнітопроводі, що, у свою чергу, за тривалої дії, викликає так звану «пожежу сталі» осердя, внаслідок чого пошкоджується ізоляція обмоток і у кінцевому випадку — пошкоджується весь трансформатор струму. Також магнітний потік індукуює у вторинній обмотці високовольтні імпульси напруги, амплітуди яких значно перевищують значення доаварійного режиму і можуть спричинити пошкодження обладнання та електричне ураження обслуговуючого персоналу.

У літературі питання аналізу режимів роботи трансформаторів струму за розмикання їх вторинних кіл залишаються майже поза увагою. Лише у [1—4] описано окремі режими та запропоновано деякі можливі рішення щодо захисту трансформатора струму від перенапруг, коли розмикається його вторинне коло.

Метою роботи є порівняльний аналіз результатів розрахунку рівнів напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора струму, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання аварійного режиму його роботи та методами аналітичних розрахунків.

Результати дослідження

Для усталеного режиму запропоновано прості методи наближеного визначення амплітуди імпульсу напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора струму за протікання синусоїдного первинного струму. При цьому користуються двокусково-лінійною вебер-амперною характеристикою магнітопроводу трансформатора (рис. 1).

Метод 1

Перший метод розрахунку амплітуд напруг на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора струму полягає в такому.

З характеристики намагнічування магнітопроводу трансформатора визначаємо координати точки «коліна»: магнітну індукцію B_s та напруженість магнітного поля H_s .

Далі визначаємо потокозчеплення вторинної обмотки за формулою

$$\Psi_{2s} = B_s \cdot w_2 \cdot S \quad [Вб], \quad (1)$$

де w_2 — кількість витків вторинної обмотки трансформатора струму; S — площа поперечного перерізу магнітопроводу.

Визначаємо миттєве значення струму точки «коліна»

$$i_{1s} = \frac{H_s \cdot l}{w_1} \quad [А], \quad (2)$$

де l — середня довжина магнітної силової лінії осердя; w_1 — кількість витків первинної обмотки трансформатора струму.

Визначаємо час t_s , коли миттєве значення первинного струму i_1 трансформатора досягне значення i_{1s}

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) \quad [с]. \quad (3)$$

За час $\Delta t = 2 \cdot t_s$, коли осердя перемагнітиться від значення магнітної індукції $(-B_s)$ до значення $(+B_s)$, приріст потокозчеплення вторинної обмотки становитиме $\Delta \Psi_{2s} = 2 \cdot \Psi_{2s}$.

Тоді амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки визначатиметься за формулою

$$U_{2m} = \frac{\Delta \Psi_{2s}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \Psi_{2s}}{2 \cdot t_s} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} \quad [В]. \quad (4)$$

Слід відмітити, що всі наведені співвідношення справедливі за умови лінійної зміни потокозчеплення обмоток трансформатора струму, коли $H_s \ll H_m = I_{1m} \cdot w_1 / l$. За малих значень амплітуди первинного синусоїдного струму I_{1m} слід користуватися Методом 2.

Метод 2

Модуль піку перенапруги на первинній обмотці трансформатора струму (за розімкнутої його вторинної обмотки) визначається за виразом

$$u_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} \Big|_{(i_1 = 0)}, \quad (5)$$

тому що, коли i_1 рівний нулю ($t = 0$), похідні

$$di_1/dt \Big|_{(t = 0)} = d(I_{1m} \cdot \sin(2\pi ft)) / dt \Big|_{(t = 0)} = 2\pi f I_{1m} \cdot \cos(2\pi ft) \Big|_{(t = 0)} = 2\pi f I_{1m}$$

і, як наслідок, $d\Psi_1/dt$ досягають своїх максимальних значень.

Точне визначення похідної потокозчеплення по струму $d\Psi_1/di_1 \Big|_{(i_1 = 0)}$ можливе, коли відома залежність динамічної магнітної проникності матеріалу осердя трансформатора струму $\mu_d = dB/dH = f(H)$.

Наближено $d\Psi_1/di_1 \Big|_{(i_1 = 0)}$ можна визначити, спрямляючи початковий відрізок кривої намагнічування $B_m(H)$, що і є основним джерелом похибки розрахунку в цьому методі.

Запишемо

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{d\Psi_1}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt}, \quad (6)$$

$$\Psi_1 = \Psi_2 \cdot \frac{w_1}{w_2}. \quad (7)$$

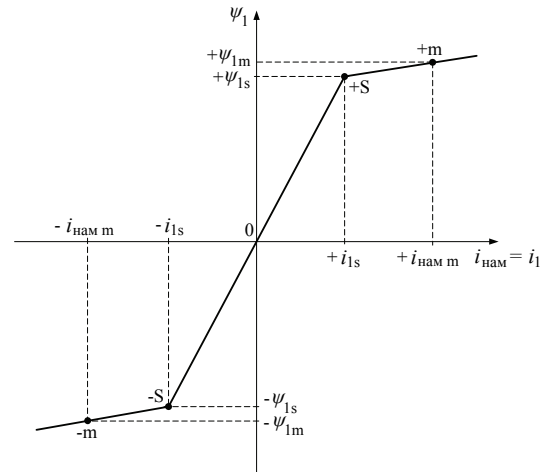


Рис. 1. Двокусково-лінійна вебер-амперна характеристика осердя трансформатора струму

Співвідношення (7) справедливе, коли коефіцієнт зв'язку між первинною і вторинною обмотками близький до одиниці, що має місце за ненасиченого осердя трансформатора струму ($i_1 \approx 0$).

Враховуючи, що пік напруги на вторинній обмотці трансформатора дорівнює

$$U_{2m} = \frac{d\Psi_2}{dt} \Big|_{(i_1 = 0)}, \quad (8)$$

отримаємо з (6), (7)

$$U_{2m} = \left[d\Psi_1/di_1 \Big|_{(i_1 = 0)} \right] \left[di_1/dt \Big|_{(i_1 = 0)} \right] \cdot w_2/w_1. \quad (9)$$

За синусоїдного первинного струму трансформатора струму значення похідних у виразі (9) дорівнюють

$$d\Psi_1/di_1 \Big|_{(i_1 = 0)} = \frac{S \cdot w_1^2}{l} \cdot \left[dB/dH \Big|_{(H = 0)} \right]; \quad (10)$$

$$di_1/dt \Big|_{(i_1 = 0)} = 2\pi f I_{1m}. \quad (11)$$

Для лінеаризованого початкового відрізка характеристики намагнічування $B_m(H)$ можемо записати

$$dB/dH \Big|_{(H = 0)} \approx \Delta B/\Delta H \Big|_{(H = 0)}. \quad (12)$$

Провівши ряд підстановок та спрощень, отримаємо остаточний розрахунковий вираз для визначення піку напруги U_{2m} на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора струму

$$U_{2m} = 2\pi f \cdot S \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot I_{1m} \left[\Delta B/\Delta H \Big|_{(H = 0)} \right] / l \quad [\text{В}]. \quad (13)$$

Описані аналітичні методи дозволяють за відомими параметрами обмоток і магнітного кола трансформатора струму швидко та з достатньо високою точністю розрахувати рівні напруг на розімкнених виводах його вторинної обмотки за різних величин синусоїдного первинного струму.

Для глибшого і точнішого моделювання та аналізу таких режимів у програмному комплексі «RE» [5] було створено розрахункові схеми одноступеневих та каскадних багаступеневих трансформаторів струму. Вони складаються з кількох блоків, кожен з яких моделює певні параметри та характеристики досліджуваного трансформатора.

На основі створеної розрахункової моделі трансформатора струму типу ТЛМ-10 (рис. 2) було проведено комп'ютерне моделювання його роботи за розмикання вторинного кола. При цьому крива намагнічування магнітопроводу (блок 2) задавалася зведеною до первинного кола вебер-амперною характеристикою $\Psi_1 = f(i_{\text{нам}})$, розрахованою за експериментально знятою вольт-амперною характеристикою досліджуваного трансформатора струму.

Блок 1 розрахункової схеми моделює первинне коло трансформатора, а блок 3 відтворює параметри його вторинної обмотки та навантаження. Розмикання вторинного кола здійснюється ключем К1.

Коефіцієнт зв'язку між першим та другим блоками рівний одиниці, а коефіцієнт зв'язку між другим та третім блоками — коефіцієнту трансформації досліджуваного трансформатора струму.

Трансформатор струму типу ТЛМ-10 (рис. 3) є малогабаритним трансформатором струму з литою ізоляцією на номінальну напругу 10 кВ з номінальним первинним 1500 А та вторинним 5 А струмами.

Він має вигляд опорної конструкції з двома магнітопроводами, первинною і двома вторинними обмотками. Останні можуть виготовлятися комбінованими (обидві обмотки служать для вимірювання та

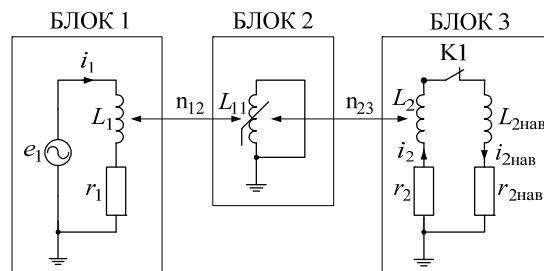


Рис. 2. Розрахункова схема досліджуваного трансформатора струму



Рис. 3. Зовнішній вигляд трансформатора струму типу ТЛМ-10

захисту) або ж одна обмотка призначена для вимірювання, а інша — для захисту. Вторинні обмотки намотують проводом типу ПЭТВ на гільзи з електрокартону і одягають на магнітопроводи.

На рис. 4 наведено осцилограми вторинної напруги досліджуваного трансформатора струму ТЛМ-10 до та після розмикання його вторинного кола за різних кратностей первинного струму. Розмикання здійснювалося в момент часу 0,08 с, коли синусоїди первинного і вторинного струмів трансформатора проходили через нуль.

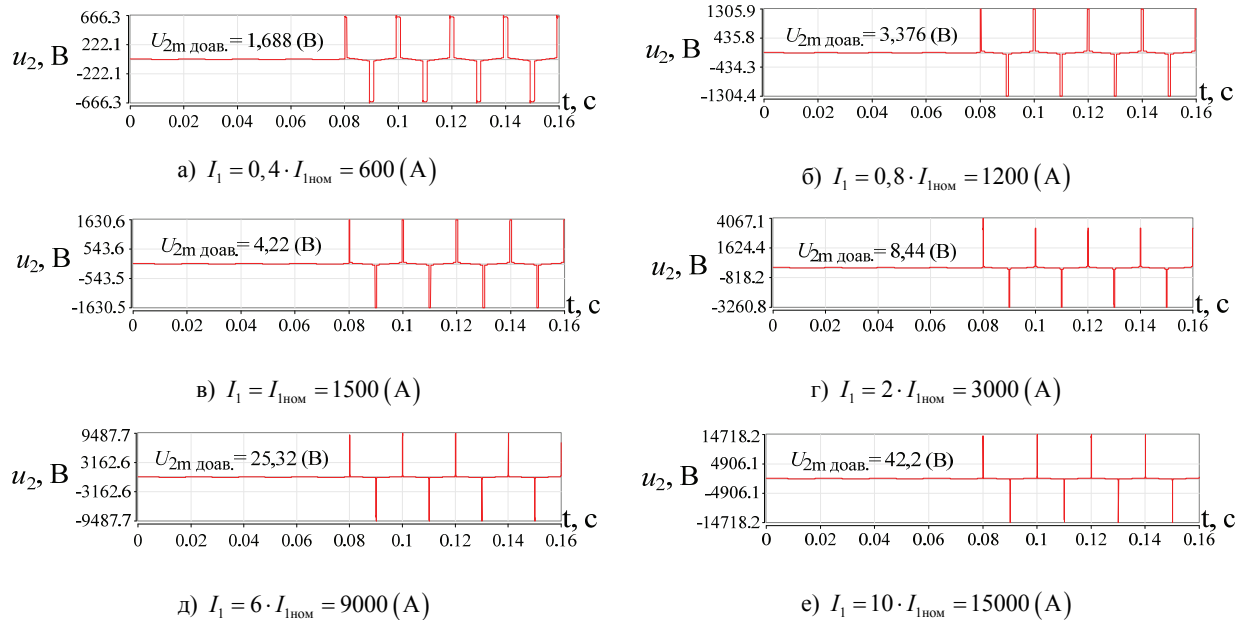


Рис. 4. Осцилограми напруг на розімкнених виводах вторинної обмотки досліджуваного трансформатора струму типу ТЛМ-10

За розмикання вторинного кола трансформатора струму напруга на його вторинних виводах значно зростає порівняно з доаварійним режимом і стає несинусоїдною внаслідок трапецієподібної зміни кривої магнітного потоку в осерді трансформатора за його насичення.

Для трансформатора струму типу ТЛМ-10 амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки сягає значення 1305,9 В вже за первинного струму 1200 А (в доаварійному режимі вторинна напруга трансформатора рівна 3,376 В). Як зазначається в [6], значення ж випробувальної напруги для вторинних кіл трансформаторів струму в умовах експлуатації становить 1000 В.

Високі рівні напруг за розмикання вторинних обмоток зумовлюють наявність фактора небезпеки під час експлуатації вимірювальних трансформаторів струму. Тому важливими є розробка та впровадження ефективних і надійних способів захисту трансформаторів від вторинних перенапруг в цих режимах.

На рис. 5 наведено залежності амплітуд напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки досліджуваного трансформатора струму ТЛМ-10 від кратностей його первинного струму, отримані шляхом комп'ютерного моделювання ($U_{2m s}$) та математичного розрахунку наведеними вище методами (метод 1 — $U_{2m I}$ та метод 2 — $U_{2m II}$).

Як бачимо, за великих кратностей первинного струму трансформатора похибки розрахунків зростають, що допустимо у зв'язку з великими значеннями струмів і наближеним врахуванням режиму глибокого насичення його магнітопроводу.

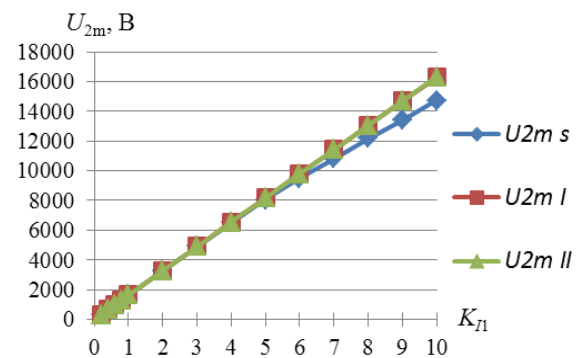


Рис. 5. Залежності амплітуд напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки досліджуваного трансформатора струму від кратностей його первинного струму

Висновки

1. Розглянуто методи аналітичних розрахунків амплітуди імпульсу напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора струму. Вказані методи забезпечують допустиму похибку обчислень та можуть застосовуватися для швидкого аналізу аварійних режимів роботи трансформаторів струму за розмикання їх вторинних кіл.

2. Створено розрахункову модель трансформатора струму типу ТЛМ-10 та проведено комп'ютерне моделювання його роботи за розмикання вторинного кола. Отримані осцилограми наочно характеризують небезпеку роботи трансформаторів з розімкненим вторинним колом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока: расчеты и конструкции / Н. И. Бачурин. — М.–Л. : Энергия, 1964. — С. 90—100.
2. Кошмидер А. Перенапряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока при насыщении сердечника / А. Кошмидер // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 1972. — № 5. — С. 503—506.
3. Гуревич В. И. Защита трансформаторов тока от работы в режиме с разомкнутой вторичной цепью / В. И. Гуревич // Про электричество. — 2010. — № 3/34. — С. 28—31.
4. Аналіз режимів роботи вторинних кіл трансформаторів струму за їх розкорочення / А. В. Журахівський, Б. М. Кінаш, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. — 2012. — № 736 — С. 43—49.
5. Равлик О. М. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики / О. М. Равлик, Т. М. Гречин, В. Й. Іваноньків // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. — 1997. — № 340. — С. 96—101.
6. Перевірка трансформаторів струму, які використовуються в схемах релейного захисту : СОУ-Н МПЕ 40.1.35.301 : 2004. / М-во палива та енергетики України. — Офіційне видання. — К. : ГРІФРЕ, 2005. — 71 с. — (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція).

Рекомендована кафедрою електричних систем та мереж ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.11.2015

Журахівський Анатолій Валентинович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електричних систем та мереж;

Кенс Юрій Амброзівич — канд. техн. наук, доцент;

Ференсович Роман Ярославович — аспірант кафедри електричних систем та мереж, e-mail: femary@ukr.net.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

A. V. Zhurakhivskiy¹
Yu. A. Kens¹
R. Ya. Ferensovych¹

The Analysis of Operating Mode of Current Transformer with Open Secondary Circuit by the Methods of Analytical Calculations

¹Lviv Polytechnic National University

There has been carried out the analysis of operating modes of current transformers with opening of their secondary circuits. The methods of analytical calculations of voltage levels on the open terminals of secondary windings of current transformers are proposed for using with the purpose of quick analysis of such operating modes. The comparative analysis of calculation results of amplitudes of voltage pulses on the open secondary winding terminals of current transformer type TLM-10, which have been obtained by using computer simulation of its emergency operating mode and analytical calculation, is carried out.

Keywords: current transformer, secondary circuit, overvoltage, methods of analytical calculations.

Zhurakhivskiy Anatolii V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electrical Systems and Networks;

Kens Yurii A. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor;

Ferensovych Roman Ya. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Systems and Networks, e-mail: femary@ukr.net

А. В. Жураховский¹
Ю. А. Кенс¹
Р. Я. Ференсович¹

Анализ режима работы трансформатора тока с разомкнутой вторичной цепью методами аналитических расчетов

¹Национальный университет «Львовская политехника»

Проведен анализ режимов работы трансформаторов тока с разомкнутыми их вторичными цепями. Предложено использование методов аналитических расчетов уровней напряжений на разомкнутых выводах вторичных обмоток трансформаторов тока с целью быстрого экспресс-анализа таких режимов работы. Осуществлен сравнительный анализ результатов расчета амплитуд импульсов напряжения на разомкнутых выводах вторичной обмотки трансформатора тока типа ТЛМ-10, полученных путем компьютерного моделирования его аварийного режима работы и аналитического вычисления.

Ключевые слова: трансформатор тока, вторичная цепь, перенапряжения, методы аналитических расчетов.

Жураховский Анатолий Валентинович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электрических систем и сетей;

Кенс Юрий Амброзиевич — канд. техн. наук, доцент;

Ференсович Роман Ярославович — аспирант кафедры электрических систем и сетей, e-mail: femary@ukr.net