

А. В. Журахівський¹
Ю. А. Кенс¹
Р. Я. Ференсович¹
Н. Б. Дьяченко¹

ЗАХИСТ ВІД НАДНАПРУГ РОЗІМКНЕНОГО ВТОРИННОГО КОЛА ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Наведено результати досліджень режимів роботи системи захисту від наднапруг розімкненого вторинного кола трансформатора струму. Дослідження виконувались шляхом натурального експерименту та комп'ютерного моделювання. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів методом натурального експерименту та комп'ютерного моделювання з метою оцінки ефективності роботи запропонованої системи захисту на прикладі трансформатора струму типу ТЛМ-10.

Ключові слова: трансформатор струму, аварійний режим, розімкнене вторинне коло, наднапруги.

Вступ

Як відомо [1—6], режим розімкненого вторинного кола трансформатора струму (ТС) є небезпечним як для самого трансформатора і під'єданого до нього обладнання вторинних кіл, так і для обслуговуючого персоналу, який виконує роботи у цих колах. Нормативні документи [1] забороняють оперативному персоналу під час протікання первинного струму розмикати вторинне коло ТС і зобов'язують закорочувати виводи вторинної обмотки ТС спеціальною перемичкою перед початком проведення робіт у цих колах.

За режиму розімкненого кола вторинного навантаження ТС на виводах його вторинної обмотки індуються високовольтні імпульси напруги, небезпечні для обладнання та обслуговуючого персоналу. Так у [2, 3] автором описано випадки пошкодження ТС в електричних мережах внаслідок обриву їх вторинних кіл, що супроводжувалися вибухами трансформаторів і врешті призвели до системної аварії (одного разу відключився блок теплової електростанції [2]).

Питання аналізу режимів роботи системи захисту від наднапруг розімкненого вторинного кола ТС у відомих джерелах [2—4], на наш погляд, розглянуті досить загально. Тому метою нашої роботи є проведення ґрунтовнішого дослідження режимів роботи системи захисту за обривів вторинного кола ТС. Отримані при цьому результати слугуватимуть основою для розробки можливих способів захисту ТС від перенапруг за режиму розімкненого вторинного кола, проведення комп'ютерного моделювання таких режимів та лабораторного випробування з метою вибору оптимальної та надійної системи захисту ТС.

Метою статті є проведення порівняльного аналізу отриманих шляхом лабораторного експерименту та комп'ютерного моделювання у програмах «RE» [7] та «FASTMEAN» [8] параметрів режимів роботи запропонованої системи захисту від наднапруг розімкненого вторинного кола ТС на прикладі ТС типу ТЛМ-10 ($U_{ном} = 10$ кВ, $k_{ном} = 1500/5$). Отримані результати використано для оцінки ефективності запропонованої системи захисту.

Отримані результати досліджень

Для оцінки ефективності запропонованої системи захисту необхідні значення очікуваних напруг на затискачах розімкненого вторинного кола ТС. Для ustalених режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 отримано експериментальні та розрахункові залежності (рис. 4) амплітуд напруги U_{2m} на розімкненій вторинній обмотці ТС від амплітуди синусного струму I_{1m} у первинній обмотці ТС. Лабораторні експерименти проводились за схемою, показаною на рис. 1. Для оцінки достовірності комп'ютерного моделювання режимів роботи ТС за розімкненої його вторинної обмотки задані режими симулювались на створеній цифровій моделі для ТС типу ТЛМ-10 [6]. Також отримані

розрахункові осцилограми параметрів режиму для ТС типу ТЛМ-10 де: напруга на розімкнених виводах вторинної обмотки — $u_2(t)$ та первинний струм — $i_1(t)$ ТС. При цьому у розрахунковій схемі ТС враховано втрати активної потужності в його магнітопроводі та точніше відображено вебер-амперну характеристику потокозчеплення первинної обмотки, особливо для зони ненасиченого осердя (рис. 2).

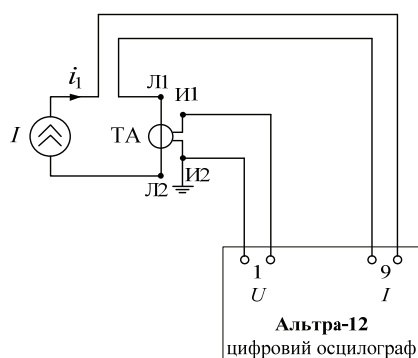


Рис. 1. Схема осцилографування параметрів режиму розімкненої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10

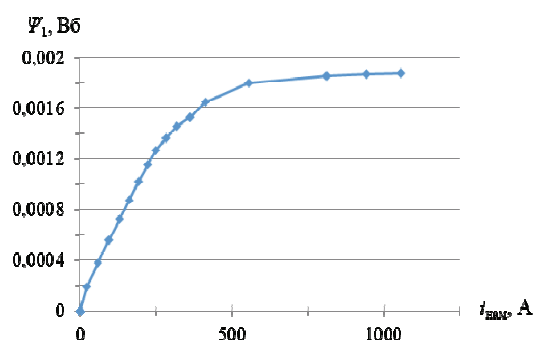


Рис. 2. Вебер-амперна характеристика потокозчеплення первинної обмотки ТС типу ТЛМ-10

Регульоване джерело струму I (див. рис. 1) через струмовий канал 9 цифрового осцилографа «Альтра-12» підключено до виводів Л1, Л2 первинної обмотки ТС типу ТЛМ-10, а виводи його вторинної обмотки — до каналу 1 вимірювання напруги.

За розімкненої вторинної обмотки ТС для конкретних значень усталеного первинного струму I_1 цифровим осцилографом «Альтра-12» отримано натурні осцилограми первинного струму $i_1(t)$ та вторинної напруги $u_2(t)$.

На рис. 3 показані натурна і розрахункова осцилограми напруги на затискачах розімкненої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 за амплітуди первинного струму $I_{1m} = 524$ А. Для інших величин первинного струму ТС отримані результати показано на рис. 4 у вигляді залежності $U_{2m}(I_{1m})$.

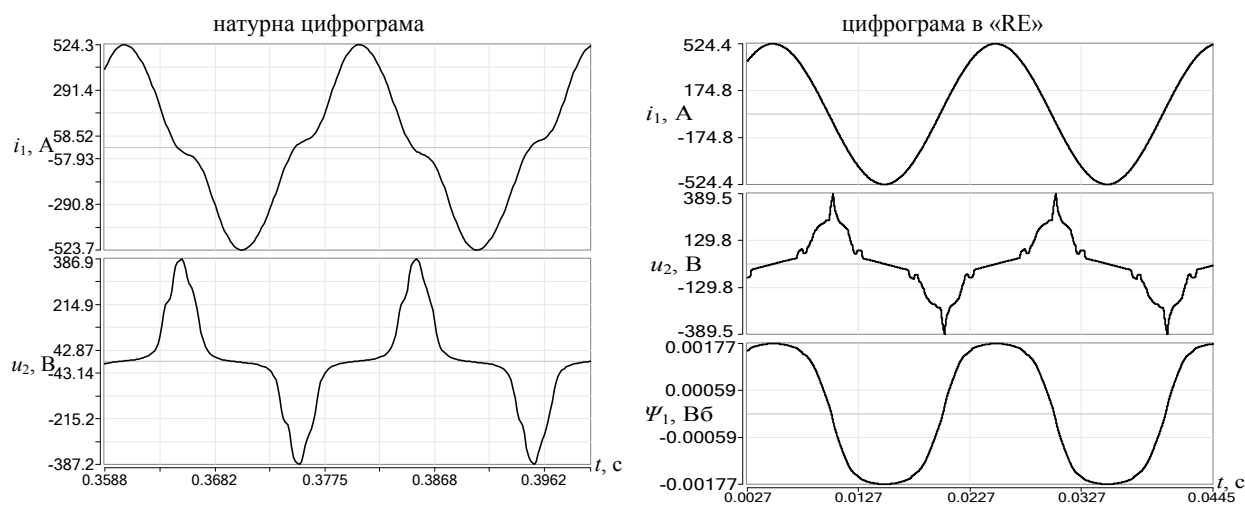


Рис. 3. Напруга на затискачах розімкненої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10

Для порівняльної оцінки точності відтворення режиму роботи ТС типу ТЛМ-10 за розімкненої вторинної обмотки та підведення до його первинної обмотки струму I_1 промислової частоти 50 Гц, розраховані відносні зведені похибки δ значень амплітуди напруги U_{2m} відносно таких же значень, отриманих за результатами натурального експерименту.

Як впливає з рис. 4, величина відносної похибки δ коливається в межах від -16% (за амплітуди струму $I_{1m} = 272$ А) до $+19\%$ (за струму $I_{1m} = 1086$ А).

Така похибка викликана низкою факторів, які не вдалося врахувати в розрахунках у програмному комплексі, в першу чергу через неточність задання в комплексі «RE» вебер-амперної характеристики (рис. 2), за умови відсутності необхідних доступних даних щодо параметрів осердя цього ТС (залежність $B(H)$ для матеріалу магнітопроводу, його габарити, вага тощо).

Як видно з розрахункових осцилограм (рис. 3), для точного відтворення форми та амплітуди піку

вторинної напруги u_2 необхідно якомога точніше відтворити вебер-амперну характеристику потокозчеплення первинної обмотки ТС для малих струмів в області переходу значення струму через нуль.

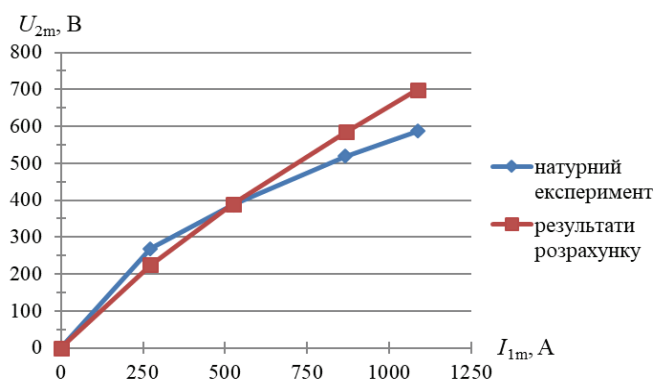


Рис. 4. Залежність амплітуди напруги U_{2m} на затискачах розімкненої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 від амплітуди I_{1m} його первинного струму

них синусоїдних струмів промислової частоти 50 Гц з амплітудами $I_{1m} = 272 \dots 1086$ А у первинній обмотці ТС типу ТЛМ-10, можна орієнтовно оцінити рівень наднапруг на затискачах його розімкненої вторинної обмотки.

В описаних у [2—4, 9, 10] схемах пристроїв захисту ТС від вторинних наднапруг елементи схем (конденсатори, резистори, напівпровідникові елементи тощо) без гальванічного розділення підключені безпосередньо до вторинних затискачів ТС. Це різко збільшує імовірність їх пошкодження від дії наднапруг за обриву вторинного кола ТС, що в результаті може призвести до відмови захисту. Також відомо, що за нормального режиму роботи для кіл струму систем комерційного обліку споживання електричної енергії не допускається будь-яке (у тому числі і гальванічне) відведення струму від цих кіл. Тому авторами запропоновано, як один з варіантів системи захисту ТС від наднапруг за обриву його кола вторинного навантаження, використання в якості обмежувача перенапруг (ОПН) на затискачах вторинної обмотки ТС пробивного запобіжника типу ПП-А/3 з захисним повітряним іскровим проміжком [11].

Система захисту після спрацювання обмежує напругу на затискачах вторинної обмотки ТС до рівня напруги спрацювання (351...600 В, 50 Гц) пробивного запобіжника типу ПП-А/3.

Для аналізу роботи запропонованої системи захисту авторами проведено комп'ютерну симуляцію режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 за обриву кола вторинного навантаження. Комп'ютерна симуляція режимів проводилась на створеній у програмі «FASTMEAN» цифровій моделі ТС з під'єднанням до затискачів його вторинної обмотки пробивним запобіжником типу ПП-А/3.

На рис. 5 показана розрахункова схема для симулювання режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 за первинного номінального струму $I_{1ном} = 1500$ А.

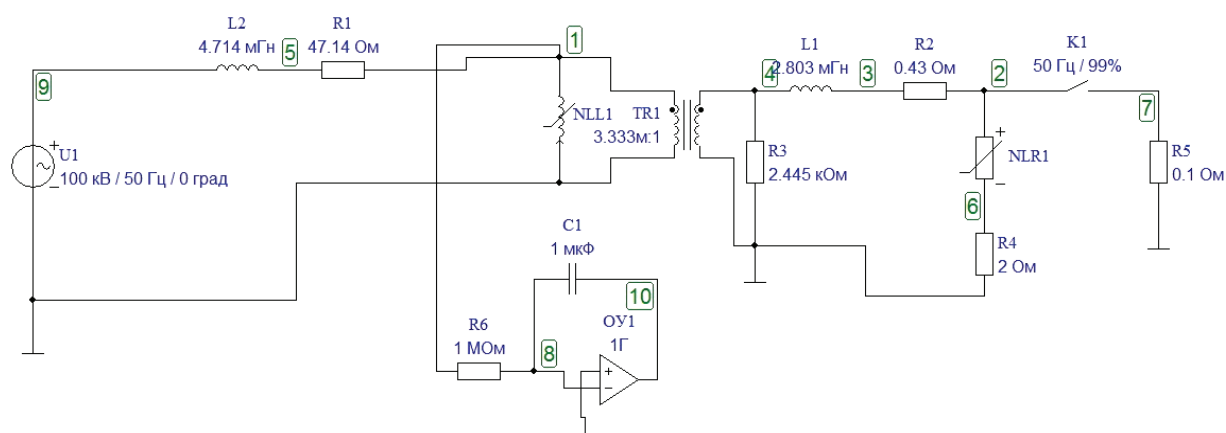


Рис. 5. Розрахункова схема для симулювання режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 за первинного номінального струму $I_{1ном} = 1500$ А

Саме за таких малих струмів відбувається швидка зміна потокозчеплення вторинної обмотки ТС, що і приводить до виникнення піку напруги u_2 з відповідною амплітудою U_{2m} . Також на результати розрахунків впливає і задана форма струму в первинній обмотці ТС. У програмі «RE» задавався синусоїдний струм, тоді як за натурального експерименту відносно малопотужне джерело струму повністю не формувало синусоїдний струм (див. рис. 3), тим самим вищенаведені фактори відповідно впливають на результати розрахунків. На наш погляд, навіть за похибок $\delta = -16\% \dots +19\%$, за відповід-

Джерелом напруги U_1 промислової частоти 50 Гц та підключеними до нього індуктивністю L_2 і активним опором R_1 задають значення амплітуди та фази вмикання первинного струму ТС. Величина постійної часу зростання струму за увімкнення його поштовхом у коло первинної обмотки ТС взята рівною $\tau = \underline{L}_2/R_1 = 100$ мкс, за якої виникають максимальні наднапруги у вторинних колах ТС. ТС моделюють нелінійною індуктивністю $NLL1$ та ідеальним трансформатором $TR1$, відповідно підключеними до входних затискачів кола вторинного струму трансформатора, яке включає: коло вторинної обмотки ТС (індуктивність L_1 , опір R_2); активний опір R_3 , втрати в якому відтворюють втрати активної потужності в осерді ТС; обмежувач перенапруг (ОПН) — послідовно увімкнуті активні опори: нелінійний $NLR1$ (симулює пробивний запобіжник типу ПП-А/3 з максимальною напругою пробиття (спрацювання) $U_{пр} = 600$ В, 50 Гц і лінійний $R_4 = 2$ Ом; послідовно увімкнуті ключ K_1 і активний опір R_5 , що симулюють контакти електромеханічного реле, які замикають накоротко затискачі вторинної обмотки ТС; схему інтегрування напруги (ідеальний операційний підсилювач $OY1$, активний опір R_6 і ємність C_1) на нелінійній індуктивності $NLL1$ для відтворення поточозчеплення первинної обмотки ТС.

За відсутності пробиття іскрового проміжку пробивного запобіжника ($u_{пр} \leq 849$ В) диференціальний опір ОПН (нелінійний опір $NLR1$ на схемі рис. 5) взято рівним 10 МОм, а у разі пробиття іскрового проміжку ($u_{пр} > 849$ В) цей опір для пробивного запобіжника типу ПП-А/3 взято рівним 1 Ом.

На рис. 6 показані осцилограми перехідних процесів у ТС типу ТЛМ-10 за увімкнення поштовхом до його первинної обмотки номінального (рис. 6а) та десятикратного (рис. 6б) струмів: $I(R1)$ — первинний струм ТС; $I(R2)$ — вторинний струм ТС; $U(2)$ — напруга на виводах вторинної обмотки ТС; $U(10) \div \Psi_1$ — поточозчеплення первинної обмотки ТС; $U(6)$ — спад напруги на активному опорі R_4 .

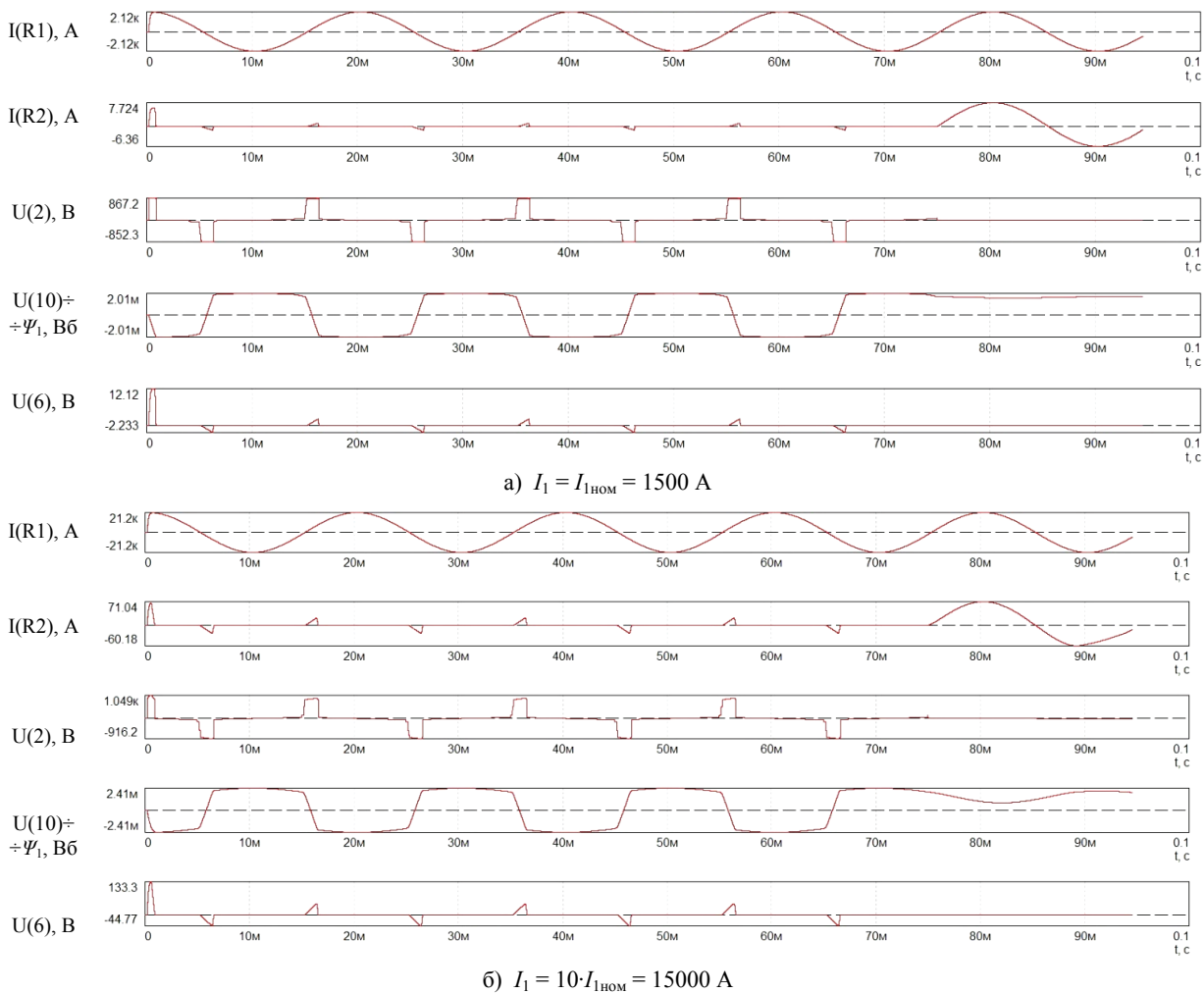


Рис. 6. Розрахункові осцилограми режиму спрацювання пробивного запобіжника ПП-А/3, під'єданого до ТС типу ТЛМ-10

Як впливає з рис. 6, ОПН запропонованої системи захисту обмежує напругу $U(2)$ на затискачах розімкненої вторинної обмотки ТС до розрахункової величини напруги спрацювання пробив-

ного запобіжника ПП-А/3 ($U_{\text{пр}} = 600 \text{ В}$, 50 Гц ; $u_{\text{пр}} = 849 \text{ В}$ у заданій вольт-амперній характеристиці нелінійного резистора NLR1). Після згасання першого піку напруги $U(2)$ встановлюється установлений режим роботи ТС. Струм $I(R2)$ у вторинній обмотці ТС виникає за пробиття іскрового проміжку в околі переходу струму $I(R1)$ у первинній обмотці ТС через нуль. За цей час відбувається перемагнічення осердя ТС, коли потокозчеплення первинної обмотки ТС $U(10)$ швидко змінюється в області ненасиченого осердя. Після входження осердя в зону насичення потокозчеплення практично не змінюється і напруга $U(2)$ на затискачах вторинної обмотки швидко згасає. В результаті потокозчеплення набуває форми трапеції, а короткочасні (до 1 мс) трикутні імпульси струму у вторинній обмотці ТС тривають, поки контакти електромеханічного реле $K1$ (див. рис. 5) не замкнуться між собою затискачі вторинної обмотки ТС. Тоді струм вторинної обмотки $I(R2)$, з урахуванням коефіцієнта трансформації первинного струму $I(R1)$, стає синусоїдним і пропорційним ТС. Ефективність роботи захисту від наднапруг розімкненого вторинного кола ТС типу ТЛМ-10 також підтверджена результатами натурних експериментів, де в якості ОПН застосовано пробивний запобіжник типу ПП-А/3 ($U_{\text{пр}} = 600 \text{ В}$, 50 Гц). Отримані натурні осцилограми подібні показаним на рис. 6.

Також варто відмітити, що проведені нами лабораторні дослідження показали відсутність необхідності встановлення систем захисту на ТС з малопотужними осердями, оскільки внаслідок швидкого насичення магнітопроводу рівні напруг на розімкнених виводах їх вторинних обмоток не перевищували небезпечну для обладнання вторинних кіл величину 1000 В (згідно з [1] це ефективне значення випробувальної напруги промислової частоти 50 Гц для вторинних кіл ТС). Так, авторами отримані натурні осцилограми режиму розкороченого вторинного кола для таких типів ТС: ТПЛ-10 75/5; ТНШЛ-0,66 800/5; ТЗЛМ-0,66 25/1; ТВЛМ-10 40/5. Однак отримані величини вторинних перенапруг таких ТС все ж становлять небезпеку для оперативного персоналу. Тому обґрунтування встановлення систем захисту необхідно розглядати для кожного конкретного типу ТС окремо. Для швидкого аналізу, з допустимою точністю рівнів вторинних напруг ТС за обриву кіл їх вторинного навантаження, можна скористатися аналітичними методами, наведеними у [6].

Висновки

Проведений порівняльний аналіз отриманих параметрів режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 з запропонованою системою захисту від наднапруг на розімкненій вторинній обмотці ТС підтвердив достовірність відтворення цих режимів на створеній цифровій моделі з допустимою похибкою.

Отримані шляхом лабораторного та комп'ютерного моделювання осцилограми параметрів режиму роботи запропонованої системи захисту з використанням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 на прикладі ТС типу ТЛМ-10 підтвердили ефективне обмеження захистом рівнів вторинних напруг трансформатора до допустимих значень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Перевірка трансформаторів струму, які використовуються в схемах релейного захисту : СОУ-Н МПЕ 40.1.35.301 : 2004 / М-во палива та енергетики України. — Офіційне вид. — К. : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України 2005. — 71 с. — (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція).
2. Гуревич В. И. Устройства защиты трансформаторов тока от обрыва вторичной цепи / В. И. Гуревич // Промышленная энергетика. — 2002. — № 11. — С. 15—16.
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. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока: расчеты и конструкции / Н. И. Бачурин. — М.—Л. : Энергия, 1964. — 376 с.
5. Кошмидер А. Перенапряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока при насыщении сердечника / А. Кошмидер // Известия высших учебных заведений. — 1972. — № 5. — С. 503—506.
6. Журахівський А. В. Аналіз режиму роботи трансформатора струму з розімкненим вторинним колом методами аналітичних розрахунків / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2015. — № 6 (123). — С. 89—94.
7. Равлик О. М. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики / О. М. Равлик, Т. М. Гречин, В. Й. Іванюк // Вісник ДУ «Львівська політехніка». — 1997. — № 340. — С. 96—101.
8. Описание FASTMEAN [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://fastmean.ru/rus/index.php?page=core.php> .
9. Patent Application Publication, US 2014/0022085 A1, G08B 21/18 (2006.01). Method and apparatus of sensing and indicating an open current transformer secondary / Christopher D. Wells. — Jan. 23, 2014.
10. Патент на корисну модель № 49392 Україна, МПК H02H 7/04 (2009). Спосіб захисту трансформатора струму від перенапруг / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко, М. М. Смігуровська, В. Я. Вінтонюк ; власник патенту Національний університет «Львівська політехніка». — Под. заявки 23.11.2009 ; опубл. 26.04.2010 р., Бюл. № 8. — 4 с.
11. Предохранители пробивные типа ПП-А/3 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://www.kzeap.ru/catalog/k12.pdf> .

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.10.2017

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

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

Ференсович Роман Ярославович — аспірант кафедри електроенергетики та систем управління, e-mail: femary@ukr.net ;

Дьяченко Наталія Богданівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

A. V. Zhurakhivskiy¹

Yu. A. Kens¹

R. Ya. Ferensovych¹

N. B. Diachenko¹

Protection of Open Secondary Circuit of Current Transformer Against Overvoltages

¹Lviv Polytechnic National University

The article describes the results of research of operating modes of the protection system of the open secondary circuit of the current transformer against overvoltages. The research was carried out by using the laboratory experiment and computer simulation. A comparative analysis of the obtained results by using the laboratory experiment and computer simulation in order to assess the efficiency of the operation of the proposed protection system with, as an example, the current transformer type TLM-10 was carried out.

Keywords: current transformer, emergency mode, open secondary circuit, overvoltages.

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

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

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

Diachenko Nataliia B. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Electrical Power Engineering and Control Systems

А. В. Жураховский¹

Ю. А. Кенс¹

Р. Я. Ференсович¹

Н. Б. Дьяченко¹

Защита от перенапряжений разомкнутой вторичной цепи трансформатора тока

¹Национальный университет «Львовская политехника»

Приведены результаты исследований режимов работы системы защиты от перенапряжений разомкнутой вторичной цепи трансформатора тока. Исследования выполнялись путем натурального эксперимента и компьютерного моделирования. Проведен сравнительный анализ полученных результатов методом натурального эксперимента и компьютерного моделирования для оценки эффективности работы предложенной системы защиты на примере трансформатора тока типа ТЛМ-10.

Ключевые слова: трансформатор тока, аварийный режим, разомкнутая вторичная цепь, перенапряжения.

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

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

Ференсович Роман Ярославович — аспірант кафедри електроенергетики і систем управління, e-mail: femary@ukr.net ;

Дьяченко Наталья Богдановна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики і систем управління