

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ФЕРЕНСОВИЧ РОМАН ЯРОСЛАВОВИЧ



УДК 621.314.224.8

**РЕЖИМИ РОБОТИ ТА ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ЗА
ОБРИВІВ ВТОРИННИХ КІЛ**

05.14.02 – «Електричні станції, мережі і системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Журахівський Анатолій Валентинович,
професор кафедри електроенергетики та
систем управління
Національного університету «Львівська політехніка».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
завідувач кафедри електричних станцій та систем
Вінницького національного технічного університету;

кандидат технічних наук
Сахно Олександр Анатолійович,
доцент кафедри електричних та електронних апаратів
Запорізького національного технічного університету.

Захист відбудеться « 25 » 05 2018 р. о 14 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті «Львівська політехніка», 79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 114 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий « 18 » 04 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, к. т. н., доцент



Коруд В. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Трансформатори струму (ТС) у складі систем генерації, розподілу та споживання електричної енергії є важливою ланкою їх кіл вимірювання, релейного захисту й автоматики (РЗА), керування тощо, оскільки забезпечують дані пристрої відповідною вхідною інформацією. Їм доводиться працювати як за усталених, так і перехідних режимів роботи електричних мереж, що характеризуються відповідними особливостями протікання електромагнітних процесів. Також ТС виконують важливі функції відокремлення високовольтних первинних кіл від низьковольтних вторинних.

Обрив вторинних кіл ТС є аварійним режимом роботи ТС. За такого режиму на розімкнених виводах вторинних обмоток ТС виникають високовольтні імпульси напруги, небезпечні для обладнання вторинних кіл і, насамперед, для обслуговуючого персоналу електроустановок. Також зростають втрати активної потужності у магнітопроводі ТС, що призводить до перегрівання його осердя і у кінцевому випадку – пошкодження ізоляції осердя та ізоляції обмоток трансформатора.

У літературі аналізу режимів роботи ТС з феромагнітними осердями за розмикання їх вторинних кіл приділено недостатньо уваги. Лише у роботах В. Гуревича, Н. Бачуріна, А. Кошмідера розглянуто режими обриву кіл вторинного навантаження ТС та запропоновано можливі шляхи їх захисту від індукованих перенапруг. Однак, пропоновані авторами рішення містять ряд недоліків. Теоретичні та практичні дослідження таких режимів роботи ТС також проведені у недостатньому обсязі, як і не впроваджено в експлуатацію ефективного та дієвого пристрою захисту ТС від вторинних перенапруг.

Враховуючи відсутність у відомих публікаціях ґрунтовних досліджень режимів роботи ТС за обриву кіл, під'єднаних до вторинних обмоток цих трансформаторів, а також практичну відсутність пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів, досліджувана проблема є актуальною. Як вказують доступні джерела інформації, пошкодження ТС та обладнання їх вторинних кіл, а також ураження персоналу в діючих електроустановках від дії перенапруг, що виникають під час обриву вторинних кіл ТС, на жаль, продовжуються.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку «Моделювання, аналіз, синтез і оптимізація електроенергетичних й енергозабезпечувальних систем та інтелектуалізація управління ними» кафедри електроенергетики та систем управління (колишнє найменування кафедри електричних систем та мереж) Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах науково-дослідної роботи «Аналіз перенапруг в електричних мережах та режими роботи вимірних трансформаторів струму й напруги в цих умовах» (№ держреєстрації 0115U004699, 2015 – 2017 р.р.), а також госпдоговірної роботи № 738 для ПрАТ «Львівобленерго» «Дослідження причин пошкодження електромагнітних трансформаторів напруги типу НКФ-110 кВ та розробка рекомендацій з підвищення їх надійності та безпеки експлуатації» (2017 – 2018 р.р.). Окремі результати роботи використовуються під час викладання навчальних дисциплін «Оптимізація режимів роботи

електроенергетичних систем», «Перенапруги та координація ізоляції в електричних мережах», «Релейний захист електроенергетичних систем (ч. 1, 2)».

Автор брав участь у цих роботах як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження режимів роботи та створення захисту ТС електричних мереж від перенапруг за обривів вторинних кіл ТС.

Виконання поставленого завдання передбачає розв'язання наступних задач:

1. Аналіз публікацій щодо досліджень режимів ТС та захисту їх від перенапруг під час обривів вторинних кіл ТС.
2. Отримання аналітичних виразів для розрахунку параметрів координат усталеного режиму роботи ТС за обриву його вторинного кола під час протікання у первинній обмотці ТС синусоїдного струму.
3. Розробка методологічних основ побудови структурних схем захисту ТС та їх вторинних кіл від перенапруг.
4. Розробка системи захисту (СЗ) від перенапруг ТС за обриву вторинних кіл та проведення досліджень з метою обґрунтування необхідності додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки ТС під час розмикання вторинного кола ТС.
5. Підтвердження проведеними дослідженнями ефективності запропонованої СЗ і обмеження перенапруг до рівня спрацювання обмежувача перенапруг (ОПН) – пробивного запобіжника типу ПП-А/3 (не більше 1000 В).

Об'єктом дослідження є процеси в електричних мережах з вимірювальними трансформаторами струму.

Предметом дослідження є усталені та перехідні режими роботи трансформаторів струму за обривів їх вторинних кіл, способи та методи їх захисту.

Методи дослідження. В основу досліджень покладено методи теорії лінійних і нелінійних кіл, чисельні методи інтегрування диференціальних рівнянь з використанням методів комп'ютерного симулювання, натурального експерименту та дослідження процесів у діючих електроустановках.

Наукова новизна й основні положення, що виносяться на захист.

1. Вперше запропоновано метод оцінки максимальних амплітуд перенапруг на виводах вторинної обмотки трансформатора струму за обриву його вторинного кола, що дає змогу здійснювати попередній аналіз перенапруг на основі паспортних даних трансформаторів струму.
2. Вперше досліджено вплив втрат активної потужності в магнітопроводах трансформаторів струму на рівень максимальних перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток, що дає змогу моделювати режими трансформаторів струму за обриву їх вторинних кіл та розраховувати величини перенапруг на вторинних виводах.
3. Вдосконалено математичну модель для дослідження перехідних процесів під час обриву вторинних кіл трансформаторів струму шляхом застосування керованого активного опору в модельованому контурі комутації, що дає змогу досліджувати вплив швидкості зміни струму у вторинному колі трансформатора струму на величини перенапруг.

4. Запропоновано принципи побудови системи захисту трансформаторів струму від перенапруг за обривів їх вторинних кіл, що дає змогу здійснювати вибір параметрів елементів системи захисту та аналізувати ефективність її роботи.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено методологію побудови структурних схем захисту трансформаторів струму та їх вторинних кіл від перенапруг, що виникають за аварійного розмикання цих кіл.

2. Запропоновано систему захисту трансформатора струму та його вторинного кола від перенапруг, яка в якості обмежувача перенапруг містить пробивний запобіжник типу ПП-А/3 та схему швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки після спрацювання обмежувача перенапруг.

3. Результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень підтверджено ефективну роботу запропонованої системи захисту від перенапруг для основних типів трансформаторів струму, які експлуатуються в електричних мережах України, що дає змогу рекомендувати її практичне застосування.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, що є в дисертації, отримані здобувачем самостійно. В опублікованих у співавторстві роботах автору належать: [1] – проведено теоретичний аналіз режимів роботи ТС з розімкненими вторинними колами; [2] – запропоновано методи аналітичних розрахунків амплітуди імпульсу усталеної напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС і проведено порівняльний аналіз результатів комп'ютерного моделювання та аналітичних обчислень на прикладі ТС типу ТЛМ-10; [3] – проведено загальний аналіз режиму роботи трансформатора струму за розмикання його вторинного кола з використанням двокусково-лінійної вебер-амперної характеристики його вторинної обмотки, досліджено аварійний режим роботи трансформатора струму типу ТПШЛ-10 з використанням спрощеної розрахункової схеми; [4] – досліджено вплив втрат активної потужності в осерді ТС на рівень перенапруг на розімкнених виводах вторинної обмотки в залежності від величини первинного струму; [5] – розроблено СЗ від перенапруг розімкненого вторинного кола ТС, створено розрахункові схеми і досліджено шляхом натурного експерименту та комп'ютерного моделювання режими роботи запропонованої СЗ на прикладі ТС типу ТЛМ-10; [7] – проведено комп'ютерне моделювання та аналіз усталених і перехідних режимів роботи каскадного двоступеневого ТС типу ТФЗМ-500 за розмикання його вторинних кіл; [15 – 17] – розроблено структурні схеми пристроїв захисту ТС: з виконавчим елементом з автоматичним фіксованим замиканням контактів [15], з застосуванням блоку мікроконтролера [16], з елементом захисту та сигнальним елементом [17].

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися на III, IV Міжнародних конференціях молодих вчених ЕРЕС-2011, 2013, V і VI Міжнародних молодіжних наукових форумах “Litteris et Artibus”: конференції ЕРЕС-2015, 2016 (м. Львів, 2011 р., 2013 р., 2015 р., 2016 р.); 70-й, 71-й, 72-й студентських науково-технічних конференціях (м. Львів, 2012 р., 2013 р., 2014 р.); Всеукраїнських конкурсах студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» (м. Маріуполь, 2013 р., 2014 р.); науково-практичній конференції «Діагностування

електричного обладнання електростанцій, підстанцій, повітряних ліній та трансформаторних олив. Обмін досвідом та перспективи удосконалення» (с. Славсько, 2015 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2015)» (м. Вінниця, 2015 р.); науково-практичній конференції «Діагностика технічного стану електричного обладнання електростанцій, підстанцій, повітряних ліній та трансформаторних олив. Нормативна база, проблеми та перспективи покращення» (с. Славсько, 2017 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ-2017» (м. Вінниця, 2017 р.); семінарах НАН України (м. Львів, 2014 р., 2017 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 17 наукових робіт, з них 4 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, 5 тез доповідей у збірниках наукових конференцій, 4 матеріали міжнародних конференцій, 3 патенти на корисні моделі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та 9 додатків. Повний обсяг дисертації складає 256 сторінок, із них: 105 рисунків по тексту, 26 таблиць, 9 додатків на 79 сторінках, 139 найменувань використаних джерел на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, на основі яких визначено предмет, об'єкт та методи дослідження, наведено відомості про наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, апробацію результатів дисертації, кількість публікацій за матеріалами дисертації, особистий внесок здобувача в опублікованих у співавторстві роботах, структуру та об'єм дисертації.

У першому розділі розглянуто публікації з результатами досліджень режимів роботи ТС за обриву кола вторинної обмотки цих трансформаторів, а також з наведеними описами пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів.

Розмикання вторинного кола ТС є *аварійним режимом* роботи ТС. За цього режиму значно зростає магнітний потік в осерді ТС внаслідок зникнення розмагнічуючої магніторушійної сили (МРС) вторинної обмотки (вторинний струм рівний нулю). Це призводить до збільшення втрат активної потужності у магнітопроводі, що, в свою чергу, за тривалої дії, викликає так звану «пожежу сталі» осердя, в результаті чого пошкоджується ізоляція осердя і обмоток та у кінцевому випадку – пошкоджується весь ТС. У більшості випадків такий процес призводить до короткого замикання в мережі та вимкнення приєднання, де увімкнтий ТС з розімкненим вторинним колом.

Крім цього, магнітний потік індукуює у вторинній обмотці ТС високовольтні імпульси напруги, які можуть руйнувати ізоляцію обладнання та призводити до електричного ураження обслуговуючого персоналу. Такі явища мають місце в процесі експлуатації ТС. Так, В. Гуревич у своїх статтях описує випадки вибухів ТС

внаслідок накопичення в їх конструкціях вибухонебезпечних газів, що виділялися під дією інтенсивних часткових розрядів у низьковольтній ізоляції за довготривалого режиму роботи з розімкненими вторинними колами. Вибухи супроводжувалися пошкодженням поблизу розташованого електрообладнання та призводили до системних аварій – одного разу відключився блок потужної теплової електростанції. Як зазначено В. Гуревичем, такий режим роботи ТС найчастіше виникав за випадання перемичок між клемами вторинних обмоток, що не використовувалися і були замкнені цими перемичками.

Попри те, що режими роботи ТС з розімкненими вторинними колами в експлуатації не є частими, однак, рівні вторинних перенапруг за настання таких режимів є досить небезпечними, особливо для обслуговуючого персоналу, який проводить роботи у вторинних колах. Тому питання безпечної експлуатації ТС та створення ефективних і надійних способів захисту від перенапруг за розмикання вторинних кіл ТС на сьогоднішній день є вкрай актуальними.

У відомих публікаціях значну увагу приділено дослідженням усталених та перехідних режимів роботи ТС. Так у 60-70-ті роки минулого століття видатні вчені Б. Стогній, І. Сирота, Є. Танкевич, В. Черненко, В. Рогоза, А. Дроздов, В. Гармаш, Н. Бачурін та інші проводили широкомасштабні дослідження усталених та перехідних режимів роботи ТС, що дало змогу створити нові конструкції трансформаторів з покращеними характеристиками.

Однак питання аналізу режимів роботи ТС за розмикання вторинних кіл ТС залишаються майже поза увагою. Лише у роботах В. Гуревича, Н. Бачуріна, А. Кошмідера описано режими розмикання кіл вторинного навантаження ТС, наведено методики визначення рівня перенапруг та запропоновано деякі можливі рішення щодо захисту ТС за таких режимів. Проте пропоновані рішення не вирішують повністю вказану проблему.

Згідно нормативних документів заборонено розривати вторинні кола ТС. Перед проведенням робіт у цих колах або ж на самих трансформаторах обслуговуючий персонал повинен замкнути вручну виводи вторинної обмотки спеціальною перемичкою. Однак ручне встановлення перемички не усуває повністю небезпеки електричного ураження обслуговуючого персоналу внаслідок можливого обриву вторинних кіл ТС.

Критично проаналізовані пропоновані вітчизняними та закордонними ученими можливі способи та апаратні рішення щодо захисту ТС та їх вторинних кіл від перенапруг, що виникають за обривів цих кіл. До основних недоліків відомих пристроїв захисту ТС від вторинних перенапруг можна віднести: відсутність гальванічного розділення кіл вторинного навантаження ТС та кіл пристроїв захисту, що зумовлює можливий витік вторинного струму у кола захисту за нормального режиму роботи ТС (що недопустимо, особливо для кіл струму систем комерційного обліку споживання електричної енергії), а також підвищує ймовірність пошкодження елементів схем пристроїв захисту (конденсатори, напівпровідникові елементи тощо) від дії вторинних перенапруг і в результаті призводить до відмови захисту; значний нагрів структури напівпровідникових елементів за спрацювання пристроїв захисту внаслідок тривалого протікання через них струму; великі вартість та габарити.

Також розглянуті конструкції і технічні характеристики ТС з замкнутим магнітопроводом та особливості режимів роботи цих трансформаторів у сучасних електричних мережах класів напруг 6 – 1150 кВ промислової частоти. Дана критична оцінка відомих заходів щодо покращення експлуатаційних характеристик ТС з замкнутим магнітопроводом, зокрема – зменшення впливів перехідних процесів у ТС та електромережах промислової частоти на точність вимірювання струму і на хибну роботу пристроїв РЗА. Відмічено також вищу експлуатаційну надійність та пожежобезпеку ТС з елегазовою ізоляцією порівняно з паперово-оливною ізоляцією.

Критично розглянуто промислові конструкції та принцип роботи нетрадиційних ТС, зокрема – оптико-електронних ТС (ОТС), що застосовують в якості давачів вхідної інформації давачі на основі магнітооптичного ефекту Фарадея, ефектів Холла, Гаусса, а також електромагнітний ТС чи пояс Роговського тощо. Відмічено переваги таких ТС порівняно з традиційними та проведена оцінка техніко-економічного застосування їх у високовольтних мережах 500 – 1150 кВ промислової частоти. Показано, що для існуючих мереж нетрадиційні ТС поки що практично не застосовують, враховуючи їх високу вартість та особливості експлуатації.

Таким чином, впровадження ОТС є перспективним рішенням, однак на сьогоднішній час у наших електроенергетичних системах в абсолютній більшості використовуються традиційні ТС, які потребують ефективнішої експлуатації.

У другому розділі на основі застосування для аналітичних розрахунків двокускової вебер-амперної характеристики (ВБАХ) обмоток ТС запропоновано метод оцінки максимальних амплітуд перенапруг на виводах вторинної обмотки ТС за обриву його вторинного кола, що дає змогу здійснювати попередній аналіз перенапруг без необхідності створення громіздких розрахункових схем ТС та моделювання характеристик намагнічування їх осердь.

Для розрахунку амплітуд напруг на розімкнених виводах вторинних обмоток ТС за координатами точки «коліна» (магнітна індукція B_s , Тл, та напруженість магнітного поля H_s , А/м) визначають потокозчеплення вторинної обмотки ($\Psi_{2s} = B_s \cdot w_2 \cdot S_{СТ}$ [Вб], де w_2 – кількість витків вторинної обмотки ТС; $S_{СТ}$ – площа поперечного перерізу сталі магнітопроводу, м²) та миттєве значення струму первинної обмотки ТС для точки «коліна» ($i_{1s} = \frac{H_s \cdot l}{w_1}$ [А], де l – середня довжина магнітної силової лінії осердя, м; w_1 – кількість витків первинної обмотки ТС).

За час $\Delta t = 2 \cdot t_s$ (t_s – час, коли миттєве значення первинного струму i_1 трансформатора досягне величини i_{1s} , с), коли осердя перемагнітиться від значення магнітної індукції ($-B_s$) до значення ($+B_s$), приріст потокозчеплення вторинної обмотки становитиме $\Delta \Psi_{2s} = 2 \cdot \Psi_{2s}$ і відповідно амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки визначатиметься за формулою

$$U_{2m} = \frac{\Delta \Psi_{2s}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \Psi_{2s}}{2 \cdot t_s} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} \quad [\text{В}]. \quad (1)$$

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

Модуль піку перенапруги, зведеної до первинної обмотки ТС (за розімкнутої його вторинної обмотки), визначається за виразом

$$u_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} | (i_1 = 0). \quad (2)$$

Коли струм i_1 рівний нулю ($t = 0$), то похідні визначаються як:

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

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

Точне визначення похідної потокозчеплення за струмом $d\Psi_1/di_1 | (i_1 = 0)$ можливе, коли відома залежність динамічної магнітної проникності матеріалу осердя ТС $\mu_d = dB/dH = f(H)$. Наближено похідну $d\Psi_1/di_1 | (i_1 = 0)$ можна визначити, спрямляючи початковий відрізок кривої намагнічування $B(H)$, що і є основним джерелом похибки розрахунку в даному методі.

Враховуючи, що пік напруги на виводах вторинної обмотки трансформатора рівний

$$U_{2m} = \frac{d\Psi_2}{dt} | (i_1 = 0), \quad (3)$$

після ряду перетворень загальний вираз для розрахунку амплітуди вторинної напруги матиме вигляд

$$U_{2m} = [d\Psi_1/di_1 | (i_1 = 0)] \cdot [di_1/dt | (i_1 = 0)] \cdot w_2/w_1. \quad (4)$$

За синусоїдного первинного струму ТС значення похідних у виразі (4) рівні:

$$d\Psi_1/di_1 | (i_1 = 0) = \frac{S_{СТ} \cdot w_1^2}{l} \cdot [dB/dH | (H = 0)]; \quad (5)$$

$$di_1/dt | (i_1 = 0) = 2\pi f I_{1m}. \quad (6)$$

Провівши ряд підстановок та спрощень, враховуючи для лінеаризованого початкового відрізка характеристики намагнічування $B(H)$ – $dB/dH | (H = 0) \approx \Delta B/\Delta H | (H = 0)$, отримаємо остаточний розрахунковий вираз для визначення величини піку напруги U_{2m} на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС

$$U_{2m} = 2\pi f \cdot S_{СТ} \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot [\Delta B/\Delta H | (H = 0)] / l \quad [В]. \quad (7)$$

Запропоновані аналітичні вирази дають змогу за відомими параметрами обмоток і магнітного кола ТС швидко та з достатньою точністю розрахувати рівні напруг на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за різних величин синусоїдного первинного струму.

Для комп'ютерного моделювання та аналізу усталених і перехідних режимів роботи одноступеневих та каскадних ТС за обривів вторинних кіл були створені розрахункові схеми ТС з врахуванням втрат активної потужності в магнітопроводах трансформаторів. Загальний вигляд розрахункової схеми одноступеневого ТС

наведено на рис. 1. Схема створена з використанням заступних схем одноступеневих ТС, наведених у відомих публікаціях І. М. Сироти, Б. С. Стогнія та інших авторів.

Розрахункова схема каскадного ТС побудована аналогічно схемі одноступеневого ТС з врахуванням ступенів поетапної трансформації первинного струму.

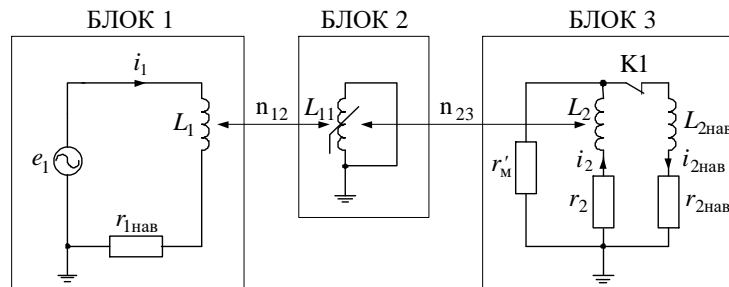


Рисунок 1 – Розрахункова схема одноступеневого ТС з врахуванням втрат активної потужності у його осерді

Розрахункова схема містить три блоки, кожний з яких моделює певні параметри ТС. Блок 1 призначений для симуляції первинного синусоїдного струму $i_1(t)$ промислової частоти, що моделюється відповідними параметрами синусоїдної ЕРС $e_1(t)$ промислової частоти та опору навантаження $r_{1нав}$. Індуктивність L_1 – індуктивність розсіювання первинної обмотки ТС.

У блоці 2 параметри нелінійної індуктивності L_{11} розрахункової схеми ТС задаються відповідно до ВБАХ первинної обмотки трансформатора $\Psi_1 = f(i_{нам})$.

У блоці 3 задаються відповідні параметри вторинної обмотки (r_2 , L_2) та параметри під'єданого до неї навантаження ($r_{2нав}$, $L_{2нав}$) ТС. Симуляція сумарних втрат активної потужності в осерді ТС здійснюється введенням до розрахункової схеми зведеного до вторинної обмотки опору r'_M .

Коефіцієнт n_{12} між першим та другим блоками рівний одиниці, а коефіцієнт n_{23} між другим та третім блоками дорівнює коефіцієнту трансформації досліджуваного ТС.

Розмикання вторинного кола ТС моделює ключ К1.

Для оцінки можливих максимальних усталених перенапруг на розімкнених затискачах вторинної обмотки ТС змодельовано без урахування втрат активної потужності у феромагнітному осерді та з мінімальним розсіюванням магнітного потоку (у розрахунковій схемі на рис. 1 не враховується опір r'_M – розглянуто ідеалізований ТС). ВБАХ обмоток досліджуваних основних конструктивних типів одноступеневих та каскадних ТС було розраховано за експериментально знятими вольт-амперними характеристиками (ВАХ) або за характеристиками намагнічування $B(H)$ відповідних типів сталей осердь ТС.

З метою оцінки достовірності комп'ютерного моделювання режимів роботи ТС було проведено порівняльний аналіз отриманих у двох програмних комплексах

(«RE» і «FASTMEAN») результатів розрахунку аварійного режиму ТС типу ТЛМ-10 з розімкненим вторинним колом. Отримані результати у програмних комплексах «RE» та «FASTMEAN» з високою точністю співпадають між собою, про що свідчать відповідні похибки між результатами розрахунків – за номінального первинного струму ТС похибки між обчисленими величинами амплітуд вторинної напруги становлять 0,001 % для розрахунку без врахування втрат активної потужності в осерді трансформатора та 0,2 % для розрахунку з врахуванням цих втрат.

На рис. 2 наведено осцилограми первинного i_1 , вторинного $i_{2\text{нав}}$ струмів та вторинної напруги u_2 для досліджуваного ТС типу ТЛМ-10 1500/5 за розмикання його вторинного кола, отримані шляхом комп'ютерного моделювання. Розмикання вторинного кола ТС здійснювалось за проходження кривої вторинного струму через нуль. За таких умов комутації слід очікувати практично усталений режим напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС.

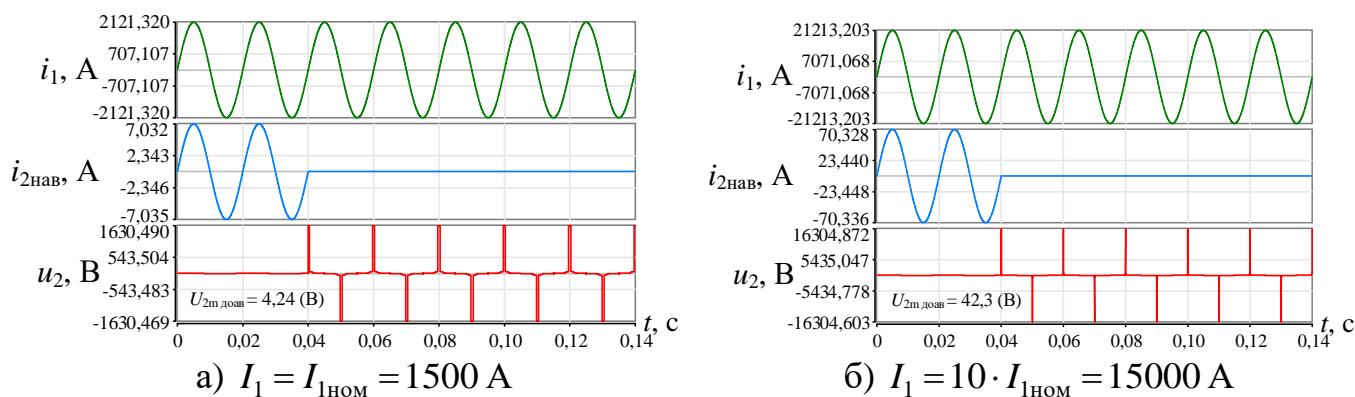


Рисунок 2 – Результати комп'ютерного моделювання режиму роботи ТС типу ТЛМ-10 1500/5 за розмикання його вторинного кола під час протікання номінального (а) та десятикратного (б) первинних струмів

Як видно з рис. 2, за розмикання вторинного кола ТС напруга на його вторинних виводах значно зростає порівняно з доаварійним режимом і стає несинусоїдною, з явно вираженими піками, внаслідок трапецеєвидної зміни кривої потокозчеплення розімкненої вторинної обмотки ТС, що виникає за глибокого насичення його осердя. Так, для ТС типу ТЛМ-10 вже за номінального первинного струму амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки сягає значення 1630 В (у доаварійному режимі ця амплітуда рівна 4,24 В). Згідно ж з нормативними документами ефективне значення випробувальної напруги промислової частоти 50 Гц для вторинних кіл ТС рівне 1000 В. Тому отримані вторинні перенапруги можуть спричинити пошкодження ізоляції ТС, приєднаних до нього пристроїв вимірювання та захисту, а також електричне ураження обслуговуючого персоналу служб РЗА.

Проведений порівняльний аналіз результатів розрахунку координат усталених режимів роботи різних типів одноступеневих ТС за обриву їх вторинних кіл і протікання в первинній обмотці синусоїдного струму, отриманих шляхом комп'ютерної симуляції режиму та аналітичного обчислення запропонованим

методом показав задовільну збіжність результатів таких розрахунків, що свідчить про адекватність створеної розрахункової схеми ТС (рис. 1) та комп'ютерного моделювання його режимів роботи (похибка обчислень не перевищувала 10 %). Для ТС типу ТЛМ-10 отримані результати розрахунків подані в таблиці, де: K_{I_1} – кратність первинного струму ТС відносно його номінальної величини; U_{2ms} – амплітуда усталеної вторинної напруги ТС, отримана шляхом комп'ютерної симуляції режиму розімкненого його вторинного кола; U_{2mI} , U_{2mII} – амплітуди вторинної напруги ТС, розраховані за формулами (1) і (7), відповідно; δ_I , δ_{II} – похибки обчислень відносно результатів симуляції, розраховані для напруг U_{2mI} і U_{2mII} , відповідно.

Таблиця

Порівняння комп'ютерного та аналітичного розрахунків амплітуд напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10

K_{I_1}	0,2	0,5	1	3	5	10
<i>Комбінована вторинна обмотка</i>						
U_{2ms} , В	326,1	815,2	1630,5	4891,5	8153,0	16304,9
U_{2mI} , В	311,2	809,3	1627,0	4888,1	8147,8	16296,3
δ_I , %	4,6	0,7	0,2	0,07	0,07	0,05
U_{2mII} , В	325,9	814,8	1629,7	4889,0	8148,3	16296,6
δ_{II} , %	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05

Також показано ефективність застосування апроксимації гіперболічним синусом залежності $H(B)$ матеріалу феромагнітних осердь сучасних ТС для комп'ютерної симуляції режиму розімкненого вторинного кола та аналітичних розрахунків амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за протікання у первинній обмотці синусоїдного струму.

У третьому розділі шляхом комп'ютерного моделювання з використанням створених розрахункових схем (рис. 1) проведено аналіз усталених та перехідних режимів роботи одноступеневих та каскадних ТС за розмикання їх вторинних кіл з врахуванням втрат активної потужності в осердях трансформаторів. Показано значний вплив цих втрат на рівень усталених перенапруг порівняно з режимами без врахування втрат активної потужності.

Наведені у другому розділі аналітичні вирази для визначення амплітуд напруги на розімкнених затискачах вторинної обмотки ТС за протікання синусоїдного первинного струму справедливі для ідеалізованих ТС – з феромагнітними осердями без втрат активної потужності і можуть використовуватися лише для орієнтовної оцінки реальних величин амплітуд вторинних напруг. Врахування втрат активної потужності в осерді ТС, зокрема, від протікання вихрових струмів, призводить до зменшення амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за рахунок розмагнічення осердя струмами, що протікають у вихрових контурах

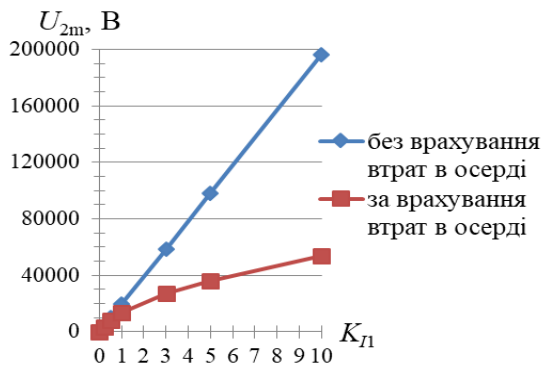


Рисунок 3 – Залежність амплітуд напруги на розімкнених виводах вторинної вимірювальної обмотки ТС типу ТШЛ-20 від кратності первинного струму

ТШЛ-20 10000/5 за різних кратностей первинного струму відносно номінальної величини.

За великих кратностей первинного струму ТС відносно номінального значення імпульси вторинної напруги дуже короткотривалі порівняно з піками за малих кратностей первинного струму і вони «зрізаються» за рахунок розмагнічування магнітопроводу вихровими струмами за швидкої зміни потокозчеплення вторинної обмотки. Вплив же втрат активної потужності в осерді на амплітуду довготривалих піків вторинної напруги значно менший (потокозчеплення вторинної обмотки змінюється відносно повільно). Так, за номінального первинного струму ТС (рис. 3) амплітуда вторинної напруги за врахування втрат активної потужності в осерді зменшується у 1,5 рази (напруги рівні відповідно 19,7 кВ та 13,3 кВ), а для десятикратного первинного струму – зменшується у 3,6 рази (напруги рівні відповідно 196 кВ та 53,9 кВ).

Аналогічні величини амплітуд вторинних напруг отримані за результатами комп'ютерної симуляції режимів обриву вторинних кіл і для інших типів одноступеневих та каскадного двоступеневого типу ТОМ-765 ТС, що свідчать про значну небезпеку для обслуговуючого персоналу підстанцій та високу ймовірність пошкодження ізоляції вторинних кіл, підключених до ТС. Зокрема, найбільші рівні усталених напруг порядку десятків і більше кіловольт виникають за розмикання вторинних обмоток шинних ТС кіл генераторної напруги потужних синхронних машин. Для таких ТС обґрунтовано доцільність створення та застосування спеціального захисту для обмеження цих перенапруг до рівня 1000 В (рівень, допустимий для кіл вторинної комутації) з наступним закороченням виводів вторинної обмотки ТС.

Розрахункові схеми ТС з врахуванням сумарних втрат активної потужності у їх осердях більш точно описують процеси у магнітопроводах та відображають задані режими роботи ТС порівняно з режимами без втрат, розглянутими у другому розділі.

На основі отриманих результатів запропоновано апроксимаційні вирази для розрахункових функцій залежностей вторинних перенапруг від кратностей

осердя. Втрати активної потужності на гістерезис менше впливатимуть на такі перенапруги, оскільки для електротехнічних сталей петлі гістерезису досить вузькі, а динамічні магнітні проникності для висхідної і низхідної гістерезисних віток, особливо в областях максимальних значень, практично співпадають.

На рис. 3 наведено залежність амплітуд вторинної напруги на розімкнених виводах вимірювальної обмотки ТС типу

первинних струмів для одноступеневих ТС за розімкнених кіл їх вторинних обмоток і за результатами виконаних розрахунків визначено типи ТС, для яких необхідно встановлювати, а для яких можна не встановлювати спеціальний захист від дії цих перенапруг.

Досліджено також перехідні процеси в ТС: за збурень струму у первинній обмотці ТС і розімкненого кола його вторинної обмотки (вмикання поштовхом струму промислової частоти до первинної обмотки ТС за максимальної аперіодичної складової струму з заданою постійною часу згасання; вмикання до первинної обмотки ТС струму ненавантаженого силового трансформатора за увімкнення його до трифазного джерела живлення промислової частоти), за збурень параметрів кола навантаження, підключеного до вторинної обмотки ТС за умови протікання у первинній обмотці ТС усталеного струму промислової частоти.

Вище наведені збурення з заданою постійною часу зміни параметру ϵ , на наш погляд, типовими, зокрема для зміни активного опору в місці погасання чи виникнення короткої електричної дуги для реальних процесів у вторинних колах ТС мереж промислової частоти за їх захисту повітряними іскровими розрядниками з напругою пробиття до 1000 В (відстань між електродами – до 0,3 мм). Для цього випадку забезпечується адекватне відтворення досліджуваних процесів з урахуванням дотримання вимог законів зміни параметрів режиму (законів комутації напруг та струмів елементів схеми тощо).

Шляхом комп'ютерного моделювання досліджено режим увімкнення до трифазного джерела живлення 35 кВ промислової частоти ненавантаженого силового трансформатора типу ТДНС-16000/35 У1 з включеними у фазах А, В, С ТС типу ТВ-35 за розімкнених їх вторинних кіл. Так, наприклад, за додатної аперіодичної складової кидка струму намагнічування силового трансформатора у фазі А перший пік цього струму сягає величини 3,67 кА. Відповідно і у потокозчепленні розімкненої вторинної обмотки ТС також спостерігається наявна додатна уніполярна складова, внаслідок чого практично відсутнє перемагнічування осердя ТС і відповідно суттєво зменшуються рівні перенапруг на затискачах розімкненої обмотки ТС. Напруга на затискачах вторинної обмотки ТС фази А відповідно до зміни потокозчеплення обмотки становить чергування додатних імпульсів зі загасаючою відносно невеликою амплітудою, а від'ємні імпульси напруги також практично невеликі. Аналогічні пікоподібні напруги виникають на затискачах розімкнутих вторинних обмоток ТС фаз В і С. Знак і значення піків цих напруг залежать від зміни відповідних потокозчеплень їх вторинних обмоток, що, в свою чергу, визначаються зміною відповідних струмів у первинних обмотках ТС цих фаз.

Подібні розрахункові осцилограми одержані і за максимальних кидків струму намагнічування силового трансформатора у фазах В та С.

Для досліджуваних у роботі основних конструктивних типів ТС за режиму вмикання поштовхом струму з аперіодичною складовою у первинну обмотку за розімкненого вторинного кола як за номінального, так і десятикратного первинних струмів ТС амплітуди імпульсу напруги у момент увімкнення є меншими за усталені значення після згасання аперіодичної складової первинного струму. Це зумовлено намагнічуванням осердя аж до зони насичення практично лише на

однополярній ділянці ВБАХ. Тоді як за усталеного режиму осердя перемагнічується симетрично за додатних і від'ємних значень потокозчеплення вторинної обмотки, зі швидким перемагніченням в ненасиченій області ВБАХ.

Для симуляції перехідних процесів за обриву вторинних кіл ТС запропоновано застосування керованого активного опору (КАО), увімкненого у місці обриву. Це дало змогу дослідити вплив швидкості зміни струму у вторинному колі ТС на величини перенапруг у місці обриву. КАО симулює зростання (по експоненті з заданою постійною часу наростання) активного опору в місці обриву. Вмикання (дешунтування) КАО здійснювалось у момент часу, коли струм у вторинній обмотці ТС сягав амплітудного значення. Під час проведення досліджень задавались відповідно максимальне (1,0 МОм; 10,0 МОм) значення КАО та значення постійної часу його зростання (0,1 мс; 1,0 мс; 10,0 мс). Результатами досліджень перехідних процесів за обриву вторинних кіл різних типів ТС для мереж 10 – 750 кВ встановлено, що у більшості випадків величини перших короткотривалих піків вторинних напруг (у момент обриву кола) значно перевищують їх усталені амплітуди і сягають значень порядку десятків і сотень кіловольт. Величини перших піків вторинних напруг особливо небезпечні для ізоляції ТС, а усталені напруги, внаслідок їх тривалості – для обслуговуючого персоналу підстанцій.

У четвертому розділі розглянуто запропоновану систему захисту (СЗ) від перенапруг за обриву вторинних кіл ТС, структурна схема якої наведена на рис. 4, та розглянуті основні вимоги до неї. Від дії перенапруг СЗ захищає: персонал служб РЗА діючих електроустановок, що працюють у вторинних колах даного ТС (наладка, ремонт тощо); ізоляцію вторинної обмотки даного ТС, до затискачів якої підключені кола струму, в яких можливий обрив; ізоляцію кіл струму (пристроїв РЗА, вимірювання, обліку електричної енергії тощо), в яких можливий обрив і які підключені до затискачів даного ТС.

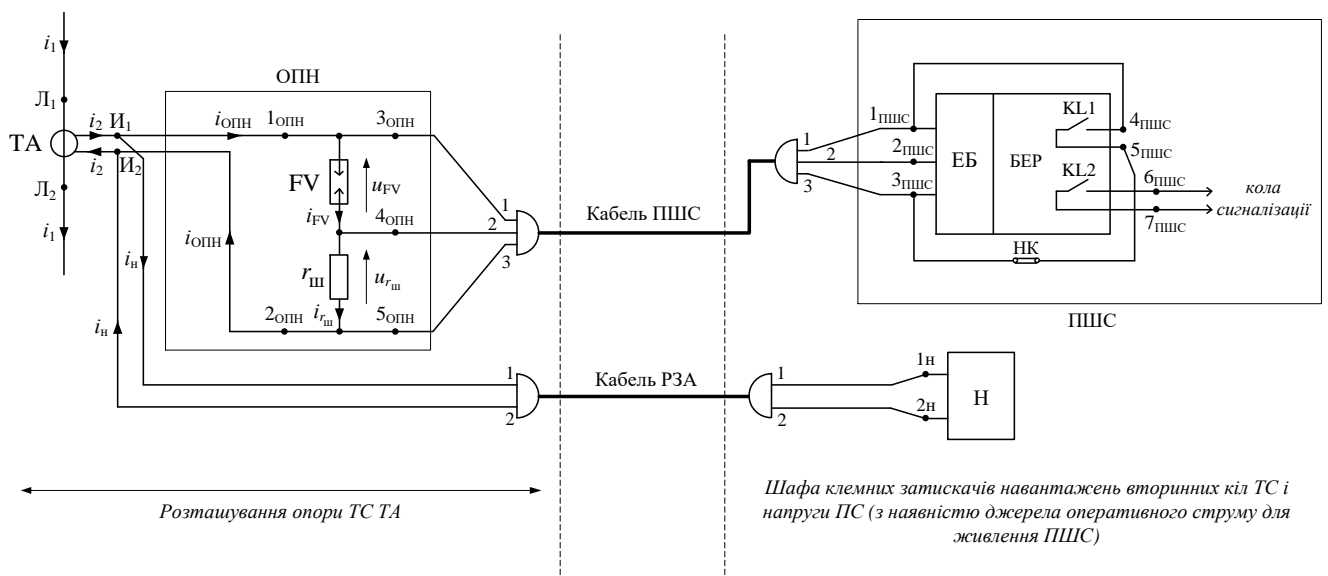


Рисунок 4 – Структурна схема СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС

ТС ТА своїми затискачами L_1 та L_2 первинної обмотки увімкнений у коло приєднання електричної мережі, а до відповідних однополярних затискачів його

вторинної обмотки (I_1 , I_2) паралельно, відповідно, підключені: обмежувач перенапруг ОПН (затискачі $1_{\text{опн}}$ і $2_{\text{опн}}$) СЗ; жили 1, 2, 3 кабелю пристрою шунтування-сигналізації (ПШС) СЗ; жили 1, 2 кабелю РЗА підстанції.

Затискачі ПШС відповідним кабелем підключені до затискачів ОПН. Кола навантаження Н (струмові кола вимірювальних приладів, пристроїв РЗА тощо) через кабель РЗА підключені до відповідних затискачів вторинної обмотки ТС ТА.

В якості обмежувача перенапруг FV запропоновано застосовувати пробивний запобіжник типу ПП-А/3 вітчизняного виробника – з напругою спрацювання до 1000 В. Наявність у запобіжнику невеликого (до 0,1 мм) повітряного іскрового проміжку забезпечує за його спрацювання (пробиття) надійне обмеження напруги на затискачах вторинних обмоток ТС за обриву кіл струму.

За обриву в колах навантаження вторинної обмотки ТС ТА (кабель РЗА, кола струму вторинного навантаження Н) та спрацювання (пробиття) пробивного запобіжника типу ПП-А/3 на резисторі $r_{\text{ш}}$ формується напруга для пуску електронного блоку (ЕБ). За спрацювання ЕБ на його виході формується постійний сигнал живлення обмотки електромеханічного реле КЛ в блоці електромеханічних реле (БЕР). Реле своїми контактами КЛ1 через накладку (НК) замикає накоротко затискачі I_1 і I_2 вторинної обмотки ТС ТА, а контактами КЛ2 подає напругу для пуску аварійної сигналізації підстанції. Накладка служить для вводу/виводу в роботу/з роботи кола шунтування вторинної обмотки ТС ТА (на час ремонту, наладки тощо).

Для проведення досліджень режимів роботи основних типів ТС з СЗ від перенапруг за обриву їх вторинних кіл розроблені відповідні розрахункові схеми з застосуванням цифрового програмного комплексу «FASTMEAN», що дало змогу дослідити як усталені, так і нестационарні режими роботи СЗ з ОПН з повітряним іскровим проміжком та обґрунтувати можливість технічної реалізації даної СЗ. Також проведеними дослідженнями показана доцільність, після спрацювання ОПН, додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки ТС за обриву їх вторинних кіл. Для живлення електромеханічного реле рекомендовано застосовувати джерело оперативного струму підстанції.

Проведеним комп'ютерним моделюванням та відповідними аналітичними розрахунками доведена можливість застосування для СЗ від перенапруг окремих типів ТС за обриву їх вторинних кіл ОПН без іскрового проміжку, що застосовуються для захисту електрообладнання від дії грозових та комутаційних перенапруг. Однак для прийняття рішення про практичне застосування таких СЗ з ОПН без іскрового проміжку необхідно провести додаткові дослідження, зокрема, натурні випробування промислового взірця тощо.

Також проведено дослідження режимів роботи ТС з СЗ від перенапруг без застосування джерела оперативного струму для шунтування їх вторинних обмоток. Особливістю такої СЗ, як показали дослідження, є залежність часу затримки у спрацюванні захисту від рівня струму у первинній обмотці ТС. Цей недолік, на жаль, за відсутності відповідної елементної бази, не дозволяє поки що практично реалізувати таку СЗ.

Ефективну роботу запропонованої СЗ від перенапруг з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості ОПН підтверджено результатами

комп'ютерного моделювання на створених цифрових моделях досліджуваних типів ТС та натурних експериментів на прикладі ТС типу ТЛМ-10. Також показана адекватність (з допустимою точністю) відтворення шляхом комп'ютерного моделювання режимів роботи СЗ на прикладі ТС типу ТЛМ-10. Отримані результати натурального експерименту та комп'ютерного моделювання наведені на рис. 5.

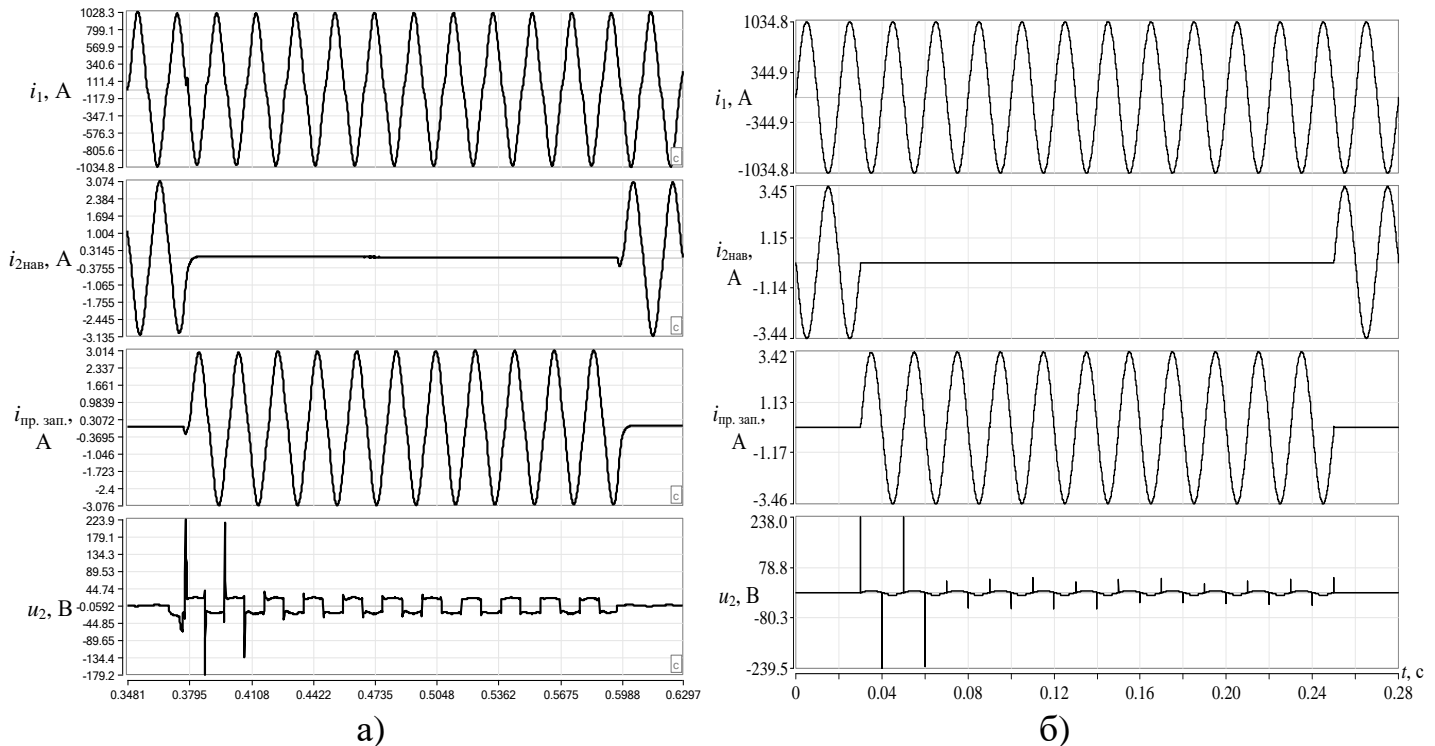


Рисунок 5 – Результати натурального експерименту (а) і комп'ютерного моделювання (б) режиму СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням в якості ОПН пробивного запобіжника типу ПП-А/З

Комп'ютерне моделювання та проведені експериментальні дослідження показали, що нема потреби у встановленні СЗ на ТС з малопотужними осердями, оскільки внаслідок швидкого насичення магнітопроводу значення напруг на розімкнених виводах їх вторинних обмоток не перевищували небезпечну для обладнання вторинних кіл величину 1000 В. Це підтверджено отриманими натурними осцилограмами режимів розімкнених вторинних кіл для таких типів ТС: ТПЛ-10 75/5; ТНШЛ-0,66 800/5; ТЗЛМ-0,66 25/1; ТВЛМ-10 40/5. Разом з тим отримані величини вторинних перенапруг таких ТС все ж становлять небезпеку для оперативного персоналу. Тому обґрунтування встановлення СЗ необхідно розглядати для кожного конкретного типу ТС окремо. Для швидкого аналізу, з допустимою точністю, величин вторинних напруг ТС за обриву кіл їх вторинного навантаження можна скористатися запропонованими аналітичними виразами, наведеними у другому розділі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача аналізу режимів роботи трансформаторів струму за аварійного розмикання їх вторинних кіл та розробки системи захисту трансформаторів струму від таких режимів, що сприятиме надійності функціонування електричних систем. В руслі даного напрямку отримано наступні результати:

1. Розглянуто конструкції, технічні характеристики трансформаторів струму з замкнутим магнітопроводом, особливості режимів роботи цих трансформаторів у сучасних мережах 6 – 750 кВ промислової частоти за розімкнутих кіл їх вторинних обмоток.

2. Проведено аналіз публікацій з результатами досліджень режимів роботи трансформаторів струму за обриву кіл вторинних обмоток цих трансформаторів, а також з описами пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів. Кількість цих публікацій виявилась незначною, а проведений аналіз підтверджує доцільність продовження досліджень таких режимів та розробки відповідних захистів для трансформаторів струму.

3. Запропоновано метод оцінки максимальних амплітуд перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток трансформаторів струму, що дає змогу здійснювати попередній аналіз перенапруг на основі паспортних даних трансформаторів струму. Результатами аналітичних розрахунків підтверджено наявність небезпечних (більше 1000 В) перенапруг на розімкнених виводах трансформаторів струму різних типів.

4. Розроблено розрахункові схеми для аналізу режимів трансформаторів струму за розмикання їх вторинних кіл з врахуванням втрат активної потужності в осерді. Показано значний вплив цих втрат на рівень перенапруг порівняно з режимами без врахування втрат.

5. Запропоновано систему захисту від перенапруг за обриву вторинних кіл трансформаторів струму, розглянуто основні вимоги до цієї системи та проведеними експериментальними дослідженнями і комп'ютерним моделюванням режимів роботи системи захисту на прикладі ТС типу ТЛМ-10 (з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості обмежувача перенапруг) підтверджено ефективність її роботи та обмеження перенапруг до значень, не більших 1000 В.

6. Проведеними дослідженнями показана доцільність використання додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки трансформаторів струму за обриву їх вторинних кіл.

7. Встановлена адекватність відтворення програмними комплексами режимів роботи системи захисту та підготовлено технічне завдання на виготовлення промислового дослідного взірця пристрою захисту, визначено підстанцію, на якій він буде встановлений у дослідно-промислову експлуатацію.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Аналіз режимів роботи вторинних кіл трансформаторів струму за їх розкорочення [Текст] / А. В. Журахівський, Б. М. Кінаш, А. Я. Яцейко,

Р. Я. Ференсович // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – № 736 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 43–49.

2. Журахівський А. В. Аналіз режиму роботи трансформатора струму з розімкненим вторинним колом методами аналітичних розрахунків [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6 (123). – С. 89–94.

3. Кенс Ю. А. Спрощений аналіз усталеного режиму роботи однокаскадного трансформатора струму за розкорочення його вторинної обмотки [Текст] / Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович, Н. Б. Дьяченко // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2015. – № 834 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 26–32.

4. Журахивский А. В. Исследование установившихся режимов работы одноступенчатого трансформатора тока при размыкании под нагрузкой его вторичной обмотки [Текст] / А. В. Журахивский, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович // Энергетика и ТЭК. – Минск, 2017. – № 1 (166). – С. 23–26.

5. Захист від наднапруг розімкненого вторинного кола трансформатора струму [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович, Н. Б. Дьяченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 5 (134). – С. 74–79.

6. Ференсович Р. Я. Дослідження режимів роботи трансформаторів струму [Текст] / Р. Я. Ференсович // Енергетика та системи керування : Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2011. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 90–91.

7. Яцейко А. Я. Аналіз аварійних режимів роботи вимірювальних трансформаторів струму [Електронний ресурс] / А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович // Енергетика та системи керування : Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2013. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 32–35. – Назва з екрану.

8. Ferensovych R. The Operation of Current Transformer with Open Secondary Circuit [Електронний ресурс] / R. Ferensovych // V Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 196–198. – Назва з екрану.

9. Ferensovych R. The Operation Mode of Single-Stage Current Transformer with Open Secondary Circuit [Електронний ресурс] / R. Ferensovych // VI Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 175–176. – Назва з екрану.

10. Ференсович Р. Я. Аналіз перехідних процесів каскадних трансформаторів струму [Текст] / Р. Я. Ференсович // 70-та студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – С. 125–127.

11. Ференсович Р. Я. Аварійні процеси у вимірювальних трансформаторах струму [Текст] / Р. Я. Ференсович // 71-ша студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 123–124.

12. Ференсович Р. Я. Режими роботи та захист трансформаторів струму за розкорочення їх вторинних кіл [Текст] / Р. Я. Ференсович // 72-а студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – С. 126–128.

13. Ференсович Р. Я. Режими роботи та аварійні процеси вимірювальних трансформаторів струму [Текст] / Р. Я. Ференсович // Збірник тез докладів Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузі «Енергетика». – Маріуполь : ПДТУ. – 2013. – С. 20.

14. Ференсович Р. Я. Аварійні розмикання вторинних обмоток трансформаторів струму [Електронний ресурс] / Р. Я. Ференсович, О. І. Жила // Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» : збірник тез / ПДТУ. – Маріуполь, 2014. – С. 20. – Режим доступу : <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/6221> (дата звернення 12.11.14). – Назва з екрану.

15. Пат. 71385 Україна, МПК Н02Н 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від перенапруг / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201200114 ; заявл. 04.01.2012 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

16. Пат. 89566 Україна, МПК Н02Н 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від пошкоджень перенапругами / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201313704 ; заявл. 25.11.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

17. Пат. 111065 Україна, МПК Н02Н 7/04(2006.01). Пристрій захисту від перенапруг трансформатора струму та його вторинних кіл / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201605446 ; заявл. 19.05.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.

АНОТАЦІЇ

Ференсович Р. Я. Режими роботи та захист трансформаторів струму за обривів вторинних кіл. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – «Електричні станції, мережі і системи». – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі аналізу режимів роботи трансформаторів струму за аварійного розмикання їх вторинних кіл і розробки системи захисту трансформаторів струму та їх вторинних кіл від перенапруг, що виникають за таких режимів.

У дисертації запропоновано метод оцінки максимальних амплітуд перенапруг на виводах вторинної обмотки трансформатора струму за розмикання його вторинного кола під час протікання у первинній обмотці синусоїдного струму, що дає змогу за допомогою простих аналітичних виразів провести попередній аналіз перенапруг на основі паспортних даних трансформаторів струму.

Для аналізу усталених та перехідних режимів роботи трансформаторів струму за обриву їх вторинних кіл створено розрахункові схеми з врахуванням втрат

активної потужності в магнітопроводах трансформаторів струму, що дало змогу змодельовати задані режими та розрахувати параметри перенапруг на вторинних виводах трансформаторів струму електричних мереж. Показано значний вплив цих втрат на рівень перенапруг порівняно з режимами без врахування втрат.

У роботі вдосконалено математичну модель для дослідження перехідних процесів під час обриву вторинних кіл трансформаторів струму шляхом застосування керованого активного опору в модельованому контурі комутації, що дало змогу дослідити вплив швидкості зміни струму у вторинному колі трансформатора струму на величини перенапруг.

Запропоновано систему захисту від перенапруг за обриву вторинних кіл трансформаторів струму, розглянуто основні вимоги до цієї системи та проведеними натурними експериментами і комп'ютерним моделюванням режимів роботи системи захисту підтверджено ефективність її роботи та обмеження вторинних перенапруг до допустимих значень.

Ключові слова: трансформатор струму, аварійний режим, обрив вторинного кола, розрахункові схеми, високовольтний імпульс напруги, перенапруга, система захисту, пробивний запобіжник.

Ferensovych R. Ya. Operation Modes and Protection of Current Transformers after Disconnection of Secondary Circuits. – On the rights of manuscript.

Thesis for a candidate degree in Technical Science, specialty 05.14.02 – «Power stations, networks and systems». – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to solving of the scientific and technical problem, which is concerned with an analysis of operation modes of current transformers after the emergency disconnection of their secondary circuits and a designing of a protection system of current transformers and their secondary circuits against overvoltages in such modes.

The method of estimation of the maximum amplitudes of overvoltages on the terminals of current transformer secondary winding after disconnection its secondary circuit, when sinusoid current flows in the primary winding, is proposed in the thesis. The method allows to carry out a preliminary analysis of overvoltages by using simple analytical equations and passport data of current transformers. The presence of dangerous (over 1000 V) overvoltages on the open terminals of the secondary windings of various types of current transformers is confirmed.

The calculation schemes for analysis of the modes of current transformers after disconnection of their secondary circuits taking into account losses of active power in the magnetic cores of current transformers are developed. The significant impact of these losses on the level of overvoltages is shown in comparison with the modes without taking into account losses.

The mathematical model for the investigation of transients after disconnection of secondary circuits of current transformers was improved by applying a controlled resistance in the simulated secondary circuit, which made it possible to investigate the impact of the velocity of current change in the secondary circuit of current transformer on the values of overvoltages.

The protection system against overvoltages after disconnection of secondary circuits of current transformers is proposed, the basic requirements for this system are considered. The efficiency of protection system operation and a limitation of overvoltages to values no more than 1000 V is confirmed by using experiments and computer simulation of operation modes of protection system for example with the current transformer type TLM-10 (by using the fuse type PP-A/3 as a surge protector).

Keywords: current transformer, emergency mode, disconnection of the secondary circuit, calculation schemes, high-voltage pulse, overvoltage, protection system, fuse.

Ференсович Р. Я. Режимы работы и защита трансформаторов тока при обрыве вторичных цепей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции, сети и системы». – Национальный университет «Львівська політехніка», Министерства образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи анализа режимов работы трансформаторов тока при аварийном размыкании их вторичных цепей и разработки системы защиты трансформаторов тока и их вторичных цепей от перенапряжений, что будет способствовать надежности функционирования электрических систем.

Рассмотрены конструкции, технические характеристики трансформаторов тока с замкнутым магнитопроводом, особенности режимов работы этих трансформаторов в современных сетях 6 – 750 кВ промышленной частоты при разомкнутых цепях их вторичных обмоток.

Рассмотрены публикации по результатам исследований режимов работы трансформаторов тока при обрыве вторичных цепей этих трансформаторов, а также описания устройств защиты от перенапряжений, возникающих при таких режимах. Количество этих публикаций оказалось незначительным, а проведенный анализ подтверждает целесообразность продолжения исследований этих режимов и разработки соответствующих защит для трансформаторов тока.

Предложен метод оценки максимальных амплитуд перенапряжений на выводах вторичной обмотки трансформатора тока при обрыве его вторичной цепи, что позволяет осуществлять предварительный анализ перенапряжений на основе паспортных данных трансформаторов тока. Подтверждено наличие опасных (больше 1000 В) перенапряжений на разомкнутых выводах разных типов трансформаторов тока электрических сетей.

Для анализа установившихся и переходных режимов работы трансформаторов тока при обрыве их вторичных цепей разработаны расчетные схемы с учетом потерь активной мощности в сердечниках трансформаторов тока, что позволило смоделировать заданные режимы и рассчитать параметры перенапряжений на вторичных выводах трансформаторов тока электрических сетей. Показано значительное влияние этих потерь на уровень перенапряжений по сравнению с режимами без учета потерь.

В работе усовершенствована математическая модель для исследования переходных процессов при обрыве вторичных цепей трансформаторов тока путем

применения управляемого активного сопротивления, введенного в моделируемый контур коммутации, что позволило исследовать влияние скорости изменения тока во вторичной цепи трансформатора тока на величины перенапряжений.

Предложена система защиты от перенапряжений при обрыве вторичных цепей трансформаторов тока, рассмотрены основные требования к этой системе и проведены натурные эксперименты системы защиты на примере трансформатора тока типа ТЛМ-10 (с применением пробивного предохранителя типа ПП-А/3 в качестве ограничителя перенапряжений). Полученными результатами подтверждено эффективность работы предложенной системы защиты и ограничения перенапряжений до допустимых значений.

Проведенными исследованиями показана целесообразность использования дополнительного быстрого шунтирования контактами электромеханического реле вторичной обмотки трансформаторов тока при обрыве их вторичных цепей.

Установлена адекватность воспроизведения цифровыми комплексами режимов работы системы защиты и подготовлено техническое задание на изготовление промышленного экспериментального образца устройства защиты, определена подстанция, на которой он будет установлен в опытно-промышленную эксплуатацию.

Ключевые слова: трансформатор тока, аварийный режим, обрыв вторичной цепи, расчетные схемы, высоковольтный импульс напряжения, перенапряжение, система защиты, пробивной предохранитель.