

ВІДГУК**офіційного опонента на дисертаційну роботу
ФЕРЕНСОВИЧА РОМАНА ЯРОСЛАВОВИЧА
«РЕЖИМИ РОБОТИ ТА ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ЗА
ОБРИВІВ ВТОРИННИХ КІЛ»,**

що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Актуальність теми дослідження. Серед обладнання високовольтних електричних мереж та систем вимірювальні трансформатори струму (ТС) є одним з найбільш аварійно-небезпечних типів електроустаткування. ТС у складі систем генерації, розподілу та споживання електричної енергії є важливою ланкою кіл вимірювання, РЗА, керування тощо, які працюють як за усталених, так і перехідних режимів роботи електричних мереж. Обрив вторинних кіл ТС є аварійним режимом роботи. 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. 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. Дослідження, що проведені в дисертаційній роботі, спрямовані на покращення рівня експлуатації та, відповідно, підвищення надійності роботи електроенергетичних систем і зменшення експлуатаційних витрат при обслуговуванні обладнання за рахунок підвищення надійності ТС, що має істотне значення для електроенергетичної галузі та відповідає науково-технічній політиці України, тому актуальність роботи п. Р.Я. Ференсовича не викликає сумнівів.

Наукова новизна, оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації та їх достовірності

Слід зазначити, що наукові результати, методи розрахунку, дослідження що проводилися під час виконання дисертації корисні не тільки у вигляді наукових результатів, що сформульовані в результаті роботи, а й корисні для наступних дослідників: інженерів, студентів і викладачів, та можуть бути використані при продовженні вивчення проблем захисту трансформаторів струму від обривів кіл вторинних обмоток.

В результаті теоретичного аналізу та обробки експериментальних даних автор вперше запропонував та обґрунтував 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.

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. Це дало змогу уточнити кількісні значення перенапруг для обґрунтованого прийняття рішення про необхідність застосування системи захисту для конкретного типу трансформатора струму та можливі її схемні рішення.

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. Це може бути використано при проектуванні та розрахунку пристроїв захисту трансформаторів струму.

Дістали подальшого розвитку методи побудови системи захисту трансформаторів струму від перенапруг за обривів їх вторинних кіл.

Всі отримані результати теоретично обґрунтовані, що забезпечено коректним застосування базових законів теоретичних основ електротехніки, вищої математики, використанням сучасного програмного забезпечення для розрахунку – «MathCAD», «RE» та «FASTMEAN». Достовірність результатів забезпечено проведенням натурних випробувань.

Значення результатів роботи для науки і практики

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу 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 цілому. Проведені теоретичні та натурні дослідження створюють науковий фундамент для подальших досліджень у цьому напрямку.

Практична цінність

На основі попередньо проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено методологію побудови структурних схем захисту трансформаторів струму та їх вторинних кіл від перенапруг, що виникають за аварійного розмикання цих кіл. 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.

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.

Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів перевірена шляхом проведення розрахунків та натурних експериментів, що дозволяє їх використати у ПрАТ «Львівобленерго».

Результати використано під час виконання господарчого договору № 738 від 29.09.2017 р.

Оцінка змісту 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.

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 способів захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів.

Відмічено, що питання аналізу режимів роботи ТС за розмикання вторинних кіл ТС залишаються майже поза увагою наукової громадськості.

Критично проаналізовані пропонувані вітчизняними та закордонними ученими можливі способи та апаратні рішення щодо захисту ТС та їх вторинних кіл від перенапруг, що виникають за обривів цих кіл. 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.

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.

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 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.

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 співпадали між собою.

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.

Обрана апроксимація 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 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.

Встановлено, що вплив втрат активної потужності в осерді на амплітуду довготривалих піків вторинної напруги (що мають місце за малих кратностей первинного струму відносно номінальної величини) значно менший (потокочеплення вторинної обмотки змінюється відносно повільно) порівняно з режимами за великих кратностей первинного струму ТС.

Встановлено, що 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 залежності вторинних перенапруг від кратності 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.

Для симуляції перехідних процесів за обриву вторинних кіл ТС запропоновано застосування керованого активного опору (КАО), увімкненого у місці обриву, що дало змогу дослідити вплив швидкості зміни вторинного струму на величини перенапруг у місці обриву.

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. 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/З 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 натурні осцилограми 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. Встановлено, що обґрунтування застосування 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 по розділах та результати роботи в цілому добре продумані та вдало сформульовані і відповідають змісту дисертації. Висновки викладають найважливіші наукові та практичні результати, отримані в кожному розділі та дисертації в цілому. У висновках наведено рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів.

Список використаних джерел включає 139 найменувань джерел вітчизняної та світової технічної літератури. Дисертація містить 9 додатків з допоміжним матеріалом.

Зміст дисертації відповідає обраній темі та спеціальності 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи, характеризується логічністю та

послідовністю. Дисертація оформлена відповідно до вимог, встановлених для дисертаційних робіт ДАК МОН України.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертаційної роботи та достатньо розкриває внесок дисертанта в науковий напрям і практичну цінність роботи.

Повнота відображення змісту дисертації в опублікованих працях. 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. Самостійно (без співавторів) написані наукові праці (крім тез доповідей) – відсутні.

Зауваження та питання

1. В роботі використовувалось моделювання за допомогою комп'ютерних програм «RE» та «FASTMEAN», але не наведено обґрунтування використання цих програм. **Яким чином автором оцінювалась адекватність результатів розрахунків в усіх досліджуваних режимах роботи ТС?**

2. На стор. 72 наведено твердження: «Як видно з наведених вище результатів розрахунків, програмний комплекс «RE» забезпечує високу точність розрахунку і ґрунтовний аналіз досліджуваних режимів роботи ТС. Тому подальше моделювання та дослідження роботи інших типів ТС проводитимемо у даній програмі», але до цього (вище) наведено твердження: «Як бачимо, отримані результати розрахунку аварійного режиму ТС типу ТЛМ-10 у програмах «RE» та «FASTMEAN» з високою точністю співпадають між собою (похибка розрахунку амплітуди вторинної напруги за розімкненого вторинного кола становить 0,001 %)). **Не наведено переконливе обґрунтування необхідності розрахунків на програмі «RE», а не «FASTMEAN»?**

3. На стор. 64 вказано: «За обраної апроксимації кривої намагнічування функцією гіперболічного синуса маємо адекватне відтворення ВБАХ обмоток ТС в діапазоні від точки «коліна» до точки «максимального насичення», що повністю забезпечує адекватність результатів розрахунку перехідних процесів за глибокого насичення осердя ТС». На стор. 82 вказано «Показано ефективність застосування апроксимації гіперболічним синусом залежності $H(B)$ матеріалу феромагнітних осердь сучасних ТС для аналітичних розрахунків амплітуди вторинної напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за протікання в первинній обмотці синусоїдного струму».

Не наведено кількісної оцінки адекватності запропонованої апроксимації гіперболічним синусом характеристик намагнічування ТС та порівняння їх з іншими функціями.

4. На стор. 81 вказано: «Для попереднього аналізу усталених режимів роботи одноступеневих ТС за розімкнених їх вторинних кіл отримано розрахункові осцилограми та вирази для параметрів координат усталеного

режиму роботи ТС за розімкненого кола вторинного навантаження за протікання у первинній обмотці трансформатора синусоїдного струму», але ж автором розраховано багато варіантів для аварійних режимів (кратність струму – 10), та, як правило, в таких режимах роботи первинний струм не буде синусоїдальним, більше того частота струму зростає. **Не проведена оцінка впливу ємностей обмоток ТС на параметри їх режиму зі зміною частоти.**

5. На стор. 120 вказано: «Запропоновано апроксимаційні вирази для розрахункових функцій залежностей вторинних перенапруг від кратності первинних струмів для одноступеневих ТС за розімкнених кіл їх вторинних обмоток». Неясно, яким чином проводилась оцінка адекватності запропонованих апроксимаційних виразів?

6. На стор. 123 вказано «Швидкодія СЗ буде забезпечуватись застосуванням чутливого швидкодійного електромеханічного реле, контакти якого шунтуватимуть накоротко затискачі вторинної обмотки ТС після спрацювання ОПН». В роботі не наведено теоретичної оцінки швидкодії захисту чи результатів експериментальних досліджень її. Адже це одна з найбільш важливих характеристик захисту ТС.

7. На стор. 124 наведено, що час спрацювання запобіжника ПП-А/З невідомий автору, однак очікуване значення цього часу складає ~ 1-2 мкс. З яких розрахунків або експериментів отримане це значення? Час пробою повітряного проміжку може бути іншим, та ще й залежати від стану контактів негерметизованого проміжку та складу повітря. Чи враховувалося це при проектуванні пристрою захисту?

8. На стор. 124 вказано: «Результати комп'ютерного моделювання показали, що за обриву вторинних кіл ТС для первинних струмів $I_{1тс} = (1 \div 10) \cdot I_{1тсн}$ час протікання струму через запобіжник становить 1 мс кожного півперіоду промислової частоти 50 Гц. Тобто тривалість протікання струму становить 0,1 від півперіоду промислової частоти». Не зрозуміло, чи враховував автор той факт, що запропонований запобіжник ПП-А/З одноразової дії? І як змінюватиметься його характеристика після багатократного спрацювання?

9. Багато питань викликає проведення експерименту в останньому розділі роботи. Не наведено характеристики генератора та осцилографа, що використовувалися під час експерименту. Отримані похибки (стор. 150) свідчать або про помилки в проведенні експерименту, або про недосконалість використаних заступних схем та моделей, що використовувалися в розрахунках. За якою методикою та довідковими даними розраховувались напруги на розімкнутих виводах вторинних обмоток ТС і чи вони корелюються з результатами, наведеними в книзі «Трансформаторы тока / [В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1989. – 416 с. : ил.»?

10. В огляді на стор. 42 автором зроблено висновок, що основними недоліками відомих пристроїв захисту ТС від вторинних перенапруг є: відсутність гальванічного розділення кіл вторинного навантаження ТС та кіл пристроїв захисту, значний нагрів структури напівпровідникових елементів за спрацювання пристроїв захисту внаслідок тривалого протікання через них струму; великі вартість та габарити, одноразовість дії пристрою захисту (стор. 38). **Нечітко сформульовано переваги запропонованого пристрою захисту порівняно з існуючими?**

11. На стор. 129 наведено схему розміщення запропонованого пристрою захисту. Чи буде така схема ефективною за випадання перемичок з клем вторинних обмоток, які не використовувалися і були замкнені цими перемичками?

12. На стор. 156 наведено результати експерименту з використанням запобіжника. Виникають запитання: чи оглядалися контакти запобіжника в результаті його спрацювання, чи відбулося зварювання контактів (судячи з осцилограми – це так)? Чому на осцилограмі показано зростання вторинної напруги ще до розривання вторинного кола (що, виходячи з осцилограми, відбулося в момент часу 0.3795 с)?

13. Результати порівнянь моделювання з врахування опору та без врахування краще було б навести у вигляді загальної таблиці для більш ефективного сприймання результатів.

14. Більше ніж 50 % джерел, що наведено в роботі старші за 5 років. Треба приділяти більше уваги пошуку нових джерел, в тому числі закордонних.

Висновок

Висловлені окремі зауваження та рекомендації істотно не впливають на загальну позитивну оцінку досліджень п. Р.Я. Ференсовича, тому що припущення та можливі неточності не впливають на отримані наукові результати та практичну цінність. П. Р.Я. Ференсович зробив значний внесок у розв'язання задачі підвищення надійності експлуатації обладнання електричних станцій, мереж та систем. Дисертація п. Р.Я. Ференсовича є самостійним завершеним науковим дослідженням, яке характеризується єдністю змісту, високим методичним рівнем, науковою новизною та практичною значимістю результатів. Дисертація містить раніше не захищені наукові положення, розв'язує конкретне наукове завдання – дослідження та вдосконалення режимів роботи трансформаторів струму за аварійного розмикання їх вторинних кіл, що сприятиме надійності функціонування електричних систем, вдосконаленню засобів захисту трансформаторів струму для підвищення надійності роботи електроенергетичних систем та зменшення експлуатаційних витрат, що має істотне значення для електроенергетичної галузі.

Вважаю, що дисертаційна робота п. Р.Я. Ференсовича відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України, які ставляться до робіт на здобуття

наукового ступеня кандидата технічних наук, зокрема п.п. 9, 11, 12 положення про «Порядок присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 зі змінами від 19.08.2015 р. № 656, а її автор Ференсович Роман Ярославович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Офіційний опонент,
кандидат технічних наук,
доцент кафедри електричних
та електронних апаратів
Запорізького національного
технічного університету



О.А. Сахно

10.05.2018 р.

Підпис *Сахно О.А.*
ЗАСВІДЧУЮ
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

