

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ГАРАН ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.314.223

УДОСКОНАЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ,
ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ АВТОТРАНСФОРМАТОРНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ
НАПРУГИ

05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бржезицький Володимир Олександрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», м. Київ,
професор кафедри теоретичної електротехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бойко Микола Іванович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», м. Харків,
професор кафедри інженерної електрофізики

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник

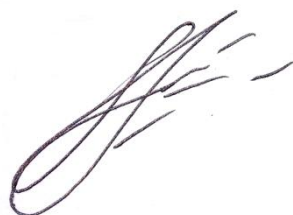
Божко Ігор Васильович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
старший науковий співробітник відділу
електромагнітних систем

Захист відбудеться 15 квітня 2019 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: м. Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. № 20, ауд. 3.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056 Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 6 » березня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток електроенергетики потребує використання високих напруг і великих струмів. Однак, недостатнім є лише виробництво, перетворення, транспортування, розподілення та споживання електричної енергії. Необхідно також точно вимірювати високі напруги (ВН) та великі струми, щоб забезпечити облік електроенергії, контроль її потоків, якості, а також безпеку використання. Для вимірювання високих напруг використовують подільники напруги, трансформатори напруги (ТН) електромагнітного типу, електрооптичні трансформатори напруги, ємнісні трансформатори напруги, кіловольтметри, сферичні розрядники тощо. Сучасні підстанції та електромережі все частіше використовують мікроелектронні цифрові пристрої, призначені для обробки, передачі та зберігання даних з виходів первинних масштабних перетворювачів високих напруг та великих струмів. Такі пристрої дозволяють поєднувати інформацію з різних частин енергооб'єктів для подальшого її аналізу та керування. Як правило, в цьому випадку низьковольтне електронне обладнання, яке приєднують до виходів високовольтних масштабних перетворювачів напруги, має високий вхідний опір, тому стає важливим дослідження холостого ходу, або наближених до нього режимів електромагнітних ТН, які найбільш широко використовуються на підстанціях та в електромережах.

На відміну від високовольтних ТН, вимірювальні автотрансформатори напруги (АТН) дозволяють одержувати більшу кількість значень вихідної напруги при зменшених, ніж у аналогічних ТН габаритах та масі. Це є особливо привабливим при підключенні на вихід вимірювальних автотрансформаторів напруги аналогово-цифрових перетворювачів, які можуть мати різні вхідні напруги, що значно менші номінальних вихідних напруг типових ТН. В таких випадках використання АТН дозволяє уникнути встановлення додаткових проміжних перетворювачів напруги, які збільшують похибки та зменшують надійність систем з використанням цифрових пристроїв. На жаль, до цього часу високовольтні автотрансформатори напруги практично не використовувались для вимірювання високих напруг.

Найбільш складною задачею при розрахунках характеристик високовольтних вимірювальних АТН є визначення потоків магнітного розсіювання, які впливають на розподіл напруги по витках обмоток і, відповідно, на точність масштабного перетворення високої напруги. Ця задача додатково ускладнюється тим, що для робочих режимів АТН, наближених до холостого ходу, неможливо використовувати в розрахунках їх параметрів відомі формули індуктивності розсіювання, які традиційно використовуються для силових автотрансформаторів, за умови рівності нулю сумарної магніторушійної сили (МРС) частин обмотки.

Велика кількість витків обмотки АТН створює додаткові ускладнення, пов'язані з появою міжшарових та міжвиткових ємнісних складових струмів, вплив яких на розподіл напруги по витках в усталених режимах ще детально не досліджувався. Крім того, ряд високовольтних перетворювачів напруги

електромагнітного типу використовує комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення напруги в обмотках на спільному стрижні, що призводить до суттєвих змін масштабного коефіцієнта автотрансформаторного перетворення напруги за різного характеру навантаження трансформатора.

Розроблення високовольтних автотрансформаторів напруги доцільно виконувати шляхом моделювання процесів в їх активних частинах, в тому числі, на етапі проектування. Визначення розподілення магнітного та електричного полів в обмотках АТН чисельними методами за допомогою відповідних програм з використанням персональних комп'ютерів (ПК) дозволяє розраховувати параметри розсіювання і інші параметри автотрансформаторів напруги, визначати розподіл напруги по окремих групах витків їхніх обмоток, удосконалювати математичні моделі таких пристроїв.

В Україні основи теорії високовольтних масштабних перетворювачів струму та напруги розроблені в Інституті електродинаміки НАНУ у працях академіка НАНУ Б.С. Стогнія, вчених Варського Г. М., Пилипенка Ю. В., Танкевича Є. М. У ПАТ «Український науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут трансформаторобудування» (м. Запоріжжя) В. К. Кілевим створена серія високовольтних трансформаторів напруги вищих класів точності. Проте опублікованих досліджень з особливостей роботи високовольтних вимірювальних автотрансформаторів напруги не виявлено, в зв'язку з чим побудова теорії високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги, є актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у відповідності до плану науково-дослідних робіт по комплексній програмі «Енергетика сталого розвитку»: «Концепція створення та впровадження високовольтних масштабних перетворювачів напруги для моніторингу визначення якості електричної енергії в електричних мережах 220-750 кВ» (державний реєстраційний № **0110U006742**), «Зменшення масогабаритних показників трансформатора напруги зі складу міри КМПЕН, розширення робочого діапазону та зменшення похибок трансформатора напруги зі складу міри КМПЕН» (державний реєстраційний № **0113U008072**, де КМПЕН – коефіцієнт масштабного перетворення електричної напруги), в яких здобувач був відповідальним виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток методів математичного моделювання автотрансформаторного перетворення напруги у високовольтних вимірювальних пристроях на основі уточнених ланцюгових та польових математичних моделей, удосконалення виконання цих пристроїв та зменшення їх похибок при вимірюванні високої напруги, створення на цій основі нових високоефективних експериментальних зразків

високовольтної вимірювальної техніки, в яких використовується автотрансформаторне перетворення напруги.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- розвинути метод математичного моделювання розсіювання магнітного поля в високовольтних вимірювальних автотрансформаторах напруги для визначення їх відповідних параметрів;
- виявити особливості масштабного перетворення напруги в високовольтних випробувальних трансформаторах, в яких відбувається комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення високої напруги, та визначити фактори, що суттєво впливають на їх характеристики;
- удосконалити систему рівнянь вимірювальних автотрансформаторів напруги для визначення розподілу напруги по окремих витках (групах витків) їх обмоток;
- розробити малогабаритний високовольтний багатодіапазонний автотрансформаторний масштабний перетворювач напруги класу точності 0,05;
- запропонувати метод коригування характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів, в яких відбувається комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення високої напруги.

Об'єкт дослідження – електричні та магнітні поля в обмотках високовольтних вимірювальних перетворювачів напруги автотрансформаторного типу.

Предмет дослідження – вплив розподілення електричних та магнітних полів на параметри автотрансформаторного перетворення високої напруги.

Методи дослідження пов'язані з використанням теорії електромагнітного поля та його електричних і магнітних складових (аналіз розподілу електричної та магнітної складових електромагнітного поля в активній частині автотрансформатора напруги дозволяє визначити фактори та ступінь їх впливу на розподіл напруги по витках та групах витків обмоток); теорії високовольтних електричних апаратів (визначення спільних особливостей режимів автотрансформаторів та трансформаторів напруги дозволяє пов'язувати теоретичний розгляд з особливостями розподілення електромагнітного поля в обмотках та магнітопроводах); теорії електроізоляційних та магнітних матеріалів (визначення граничних меж застосування електротехнічних матеріалів та змін їх властивостей в цих межах дозволяє зменшувати масогабаритні показники електротехнічного обладнання); теорії електричних вимірювань при високовольтних випробуваннях (визначення параметрів електричних та магнітних кіл високовольтних автотрансформаторів та трансформаторів за різних режимів роботи дозволяє в подальшому виконувати їх математичне моделювання); математичного моделювання та розрахунку електричних і магнітних полів за допомогою відповідних програм з використанням ПК (моделювання активної частини АТН та чисельні розрахунки за допомогою ПК дозволяють одержувати розрахункові значення параметрів АТН для їх порівняння з експериментальними даними);

математичної статистики (оцінювання розбіжності серій експериментальних даних, результатів моделювання за різними математичними моделями та програмними засобами дозволяє оцінювати похибку визначених результатів та ступінь їх взаємної відповідності); обробки результатів натурних та модельних експериментів (обробка результатів експериментів та моделювання дозволяє виконувати їх співставлення за визначеними критеріями); виконанням метрологічних робіт з високовольтними засобами вимірювальної техніки (визначення метрологічних характеристик розробленого високовольтного вимірювального електрообладнання експериментальним шляхом дозволяє підтверджувати чи спростовувати запропоновані в роботі положення).

Наукова новизна одержаних результатів:

– Вперше запропоновано метод вибору оптимального розташування вихідної частини обмотки високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги, який забезпечує отримання з високою точністю заданих параметрів приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання автотрансформатора напруги.

– Вперше виявлено причину аномально великих похибок при вимірюванні (з використанням вимірювальної обмотки) випробувальної напруги при ємнісному навантаженні високовольтних випробувальних трансформаторів та обґрунтовано метод їх усунення.

– Вперше розроблено математичну модель високовольтного автотрансформатора напруги, що, на відміну від існуючих моделей, дозволяє визначати розподіл напруги по окремих витках (або групах витків) обмотки.

– Удосконалено математичну модель розсіювання магнітного поля для високовольтного автотрансформатора напруги з використанням вісесиметричних моделей у циліндричній системі координат, що дозволяє увести дольові коефіцієнти впливу «стрижневої» та «ярмової» складових розсіювання для розрахунку параметрів АТН.

– Отримав подальший розвиток аналіз ємнісних струмів в обмотках високовольтних автотрансформаторів напруги та запропоновано векторну діаграму для розрахунку їх впливу на розподіл напруги по витках (групах витків) обмоток.

Практичне значення одержаних результатів:

– Запропоновано пристрій компенсації надлишкової індуктивності розсіювання «вимірювальної обмотки» випробувального трансформатора з високовольтною обмоткою, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, на що одержано патент України на винахід № 102864 «Високовольтний випробувальний трансформатор».

– Створено високовольтний вимірювальний автотрансформатор з максимальною робочою напругою 19 кВ класу точності 0,05, впроваджений у Вторинному еталоні України змінного струму частоти 50 Гц класу 110 кВ в Державному підприємстві «Укрметртестстандарт». Результати розрахунків характеристик високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги,

виконані за теоретично розробленими в дисертації матеріалами, підтверджені даними державної метрологічної атестації.

– Створений та метрологічно атестований високовольтний випробувальний трансформатор на напругу 180 кВ зі зменшеними масогабаритними показниками, з вихідною частиною обмотки, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, що дозволяє вимірювати випробувальну напругу на об'єкті випробувань з похибкою, що відповідає вимогам міжнародних стандартів, при зміні номінальної потужності навантаження трансформатора від 0 до 8000 Вт.

Особистий внесок здобувача. Результати, викладені у дисертаційній роботі, одержані автором особисто під науковим керівництвом професора, д. т. н. Бржезицького В. О. В наукових публікаціях, які підготовлені у співавторстві, здобувачу належать: вивід одержаних математичних виразів та побудова векторних діаграм [1, 3, 4, 5, 6, 13, 15, 16], проведення експериментальних досліджень й обробка їх результатів [3, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 17], обґрунтування використання вісесиметричної моделі автотрансформатора напруги для врахування «стрижневої» та «ярмової» складових розсіювання [13], розрахунки параметрів розсіювання високовольтного автотрансформатора напруги за допомогою програм на ПК [1, 12, 13, 7], визначення впливу ємнісних складових струмів в обмотці високовольтного АТН на розподіл напруги по витках [2].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались:

– на Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики», (м. Київ) у 2008, 2009 рр.;

– на Міжнародному симпозиумі SIEMA`2009 «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів» (м. Харків);

– на VII науково-практичній конференції «Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні», 9 – 10 червня 2009 р. (м. Київ);

– на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки»: у м. Вінниця, 2012 р. та у м. Київ, 2014 р;

– на Міжнародному симпозиумі SIEMA`2016 «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (м. Харків).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях (з них 9 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент на винахід, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій та 1 стаття в інших виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 181 сторінці, ілюстрована 51

рисунком по тексту, 6 таблицями по тексту, містить список використаних джерел зі 120 найменувань на 14 сторінках та 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання дослідження, визначені об'єкт і предмет дослідження, встановлені методи досліджень, висвітлені наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію і наукові публікації.

У першому розділі проведений огляд публікацій з об'єкту дослідження з урахуванням тенденцій розвитку наукових досягнень в галузі.

Визначено, що серед методів вимірювання високої напруги найбільш затребуваними є методи з використанням високовольтних масштабних перетворювачів високої напруги різних типів, які дозволяють приєднувати до вихідних кіл таких масштабних перетворювачів напруги низьковольтні вимірювальні прилади. Серед розглянутих публікацій виявлено, що найбільш досліджуваними масштабними перетворювачами високої напруги є трансформатори напруги електромагнітного типу, при цьому, в своїх дослідженнях науковці використовують як аналітичні методи дослідження параметрів трансформаторів напруги, так і, все частіше, використовують математичне моделювання та чисельні розрахунки цих параметрів, відзначаючи, що одним з найбільш важливих параметрів трансформаторів напруги є індуктивність розсіювання. Однак, серед досліджених публікацій не виявлено досліджень параметрів високовольтних вимірювальних автотрансформаторів напруги в режимах, наближених до режиму холостого ходу, де вплив індуктивності розсіювання проявляється найбільшою мірою. При цьому, дослідники відмічають перевагу автотрансформаторів у прецизійних масштабних перетвореннях напруги перед аналогічними трансформаторами напруги, а також можливість одержати значно більшу кількість масштабних коефіцієнтів перетворення напруги за тих самих габаритних розмірів та маси.

Оскільки в сучасній електроенергетиці поширюється тенденція «оцифрування» всіх інформаційних потоків з первинних масштабних перетворювачів напруги, струму, з датчиків, і, оскільки оцифруючі пристрої, як правило, мають високий вхідний опір, необхідні додаткові дослідження як існуючих, так і нових типів високовольтних масштабних перетворювачів високої напруги в режимах, наближених до режимів холостого ходу.

Також в досліджених джерелах не було виявлено розгляду особливостей похибок автотрансформаторного масштабного перетворення високої напруги у високовольтних випробувальних трансформаторах при одночасному трансформаторному та автотрансформаторному перетворенні напруги в них.

Оскільки ряд означених вище питань не має досі наукового вирішення, за результатами огляду літературних джерел, в наступних розділах роботи виконані відповідні дослідження.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений дослідженню впливу розподілення електричних та магнітних полів на процеси в обмотках високовольтних автотрансформаторів напруги.

Показано, що розрахунок параметрів розсіювання обмоток високовольтних АТН повинен суттєво відрізнятися від того, який застосовується для силових автотрансформаторів, оскільки принциповою основою для останнього є рівність нулю суми магніторушійних сил частин обмоток. На противагу цьому, режими роботи високовольтних вимірювальних АТН є наближеними до режимів холостого ходу.

В роботі запропоновано виконувати розрахунки розподілення магнітних полів в обмотках високовольтних АТН чисельними методами, за допомогою відповідного програмного забезпечення, що використовує метод скінченних елементів. Оскільки обмотки високовольтних вимірювальних АТН є вісесиметричними, логічним є використання циліндричної системи координат для створення математичної моделі обмоток, в першу чергу, для врахування основного внеску стрижневого магнітного розсіювання.

Модель активної частини АТН (з використанням еквівалентного циліндричного стрижня магнітопроводу) представлена на рис. 1.

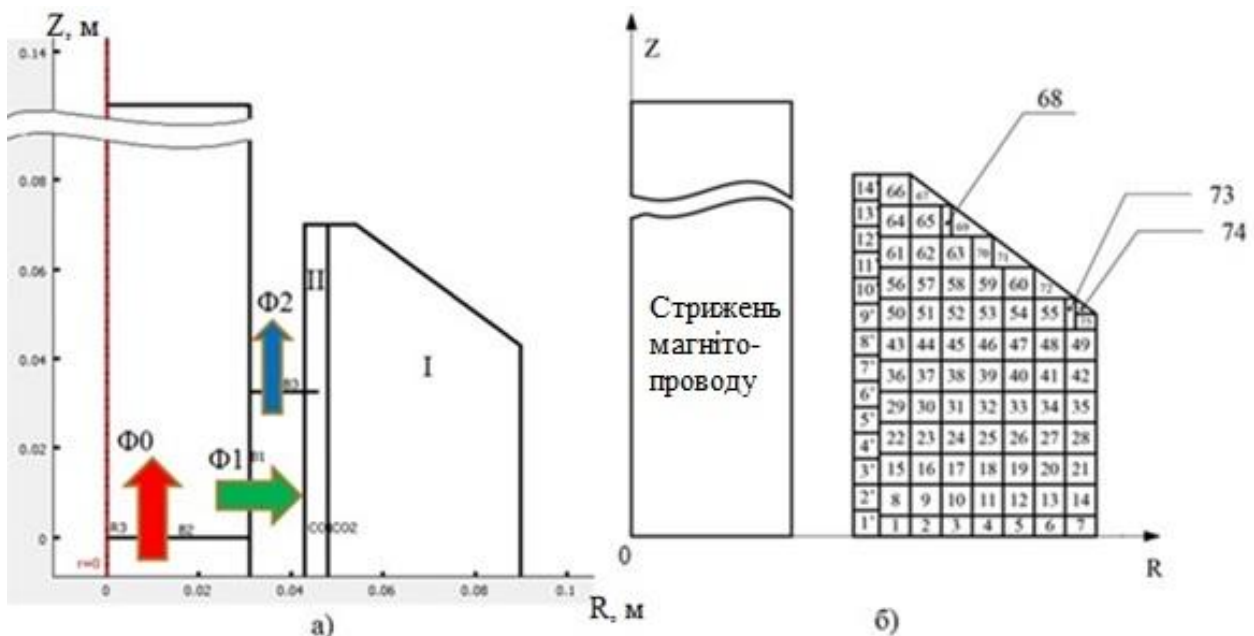


Рисунок 1 – Приклад моделі активної частини високовольтного автотрансформатора напруги у циліндричній системі координат: а) розташування стрижня та перерізу витків обмотки симетричної відносно площини, перпендикулярної вісі OZ , в програмному пакеті Comsol Multiphysics; б) сегментування половини перерізу обмотки для виконання розрахунків індуктивності розсіювання; I – вхідна частина обмотки АТН; II – вихідна частина обмотки

В роботі запропоновано виконувати визначення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання обмоток з використанням розділення результуючого

магнітного потоку на складові $\Phi 0$, $\Phi 1$, $\Phi 2$ (у відповідності до рис. 1а та їх врахування у формулі, що виключає значення $\Phi 0$):

$$Ls'_{екв} = \frac{W1^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n (\Phi 2_i - \Phi 1_i) \cdot \alpha_i - \sum_{j=1}^m (\Phi 2_j - \Phi 1_j) \cdot \alpha_j \right)}{I}, \quad (1)$$

де n – кількість сегментів, на які розбивається половина перерізу обмотки (I + II) АТН; m – кількість сегментів, на яку розбивається половина перерізу вихідної частини (II) обмотки АТН; $W1$ – кількість витків всієї обмотки АТН; I – МРС обмотки ($I = i \cdot W1$, де i – заданий струм в одному витку обмотки, А); $\Phi 1$, $\Phi 2$ – складові магнітного потоку, які розраховуються на ПК у відповідності до рис. 1а при заданому i ; α_i , α_j – питомі коефіцієнти для кожного сегменту обмотки, які розраховуються за формулами:

$$\alpha_i = \frac{2 \cdot W_i}{W1} = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}; \quad \alpha_j = \frac{2 \cdot W_j}{W2} = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^m S_j}, \quad (2)$$

де W_i , W_j – кількості витків у відповідних сегментах половини перерізу обмотки (всієї та, окремо, її вихідної частини); S_i , S_j – площі відповідних сегментів половини перерізу обмотки (рис. 1б), за умови рівномірного розподілу витків по її перерізу, $W2 = 2 \cdot \sum_{j=1}^m W_j$ – кількість витків вихідної частини обмотки;

$$W1 = 2 \cdot \sum_{i=1}^n W_i.$$

Формула (1) узагальнена в дисертації для випадку циліндричної обмотки, переріз якої не є симетричним відносно площини, перпендикулярної вісі OZ .

Застосоване в (1, 2) сегментування частин обмотки дозволяє використовувати запропонований підхід до визначення $Ls'_{екв}$ як для АТН, так і для трансформаторів напруги, з тією різницею, що в останньому випадку переріз вторинної обмотки знаходиться поза межами високовольтної обмотки.

В роботі вперше запропоновано метод вибору розташування вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги, який дозволяє вже на етапі проектування визначати необхідне значення його приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання.

Для обмотки АТН, представлені двома симетричними витками (або групами витків), геометричні центри яких характеризуються точками вісесиметричної системи координат (R, Z) та $(R, -Z)$, можна знайти такі їх значення, для яких еквівалентна, приведена до кількості витків первинної обмотки, індуктивність розсіювання за формулою (1) дорівнюватиме нулю. Розташування витків вихідної частини обмотки в таких центрах дозволить мінімізувати приведену еквівалентну індуктивність розсіювання обмоток АТН. Також, можна розрахувати геометричні місця центрів, для яких різниця між приведеними потікозчепленнями розсіювання відповідних частин обмоток становитиме певне заздалегідь задане значення. Приклад розрахунку геометричних місць точок, яким відповідають певні значення різниць

приведених поточкозчеплень за формулою (1), наведений на рис. 2 (у відсотках до першої частини складових у дужках (1)).

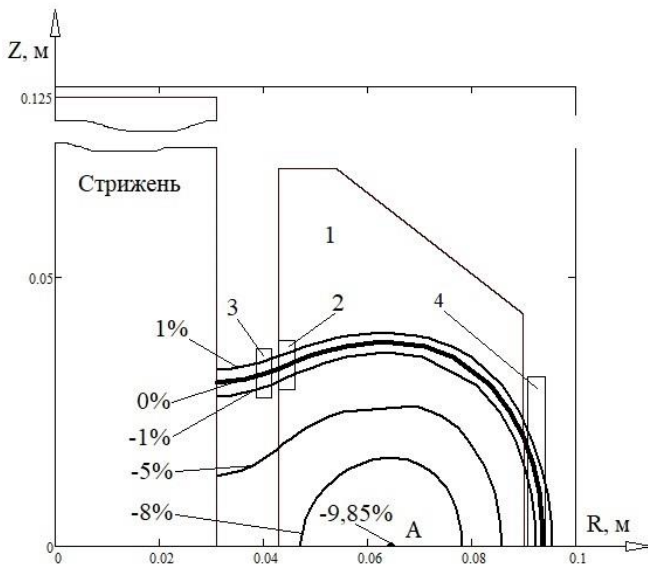


Рисунок 2 – Геометричні місця точок, яким відповідають певні сталі значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання для конфігурації моделі первинної обмотки та магнітопроводу за рис. 1: 1 – обмотка зі струмом; 2 – прогнозоване розташування витків вихідної частини обмотки автотрансформатора; 3 – прогнозоване розташування витків вторинної обмотки трансформатора; 4 – прогнозоване розташування витків обмотки для каскадного з'єднання трансформаторів

моделі, для одержання результуючого значення індуктивності розсіювання використовуються результати обчислення складових потоків розсіювання у двох моделях – «стрижневій» (за попереднім розглядом) та «капсульній» (яка сформована з використанням моделі циліндричного магнітопроводу, побудованого на основі еквівалентного кругового перерізу стрижня, дійсних розмірів його вікна і перерізу обмотки), при цьому результуючий потік розсіювання для розрахункового витка (групи витків) пропонується розраховувати за формулою:

$$\Phi_{рез} = \Phi' * K1 + \Phi'' * K2, \quad (3)$$

де Φ' – потік розсіювання для «стрижневої» моделі; Φ'' – потік розсіювання для «капсульної» моделі, а $K1$, $K2$ – їх дольові коефіцієнти, визначені в роботі, причому, $K1 + K2 = 1$.

В другому розділі дисертаційної роботи також отримав подальший розвиток аналіз розподілу ємнісних струмів в обмотках високовольтних АТН, які призводять не тільки до появи ємнісних струмів між шарами витків, а й до перетікання ємнісних складових струмів по витках обмотки, що є особливо

Аналіз рис. 2 показує, що можливим є проектування обмоток високовольтних АТН таким чином, щоб заздалегідь мінімізувати приведену еквівалентну індуктивність розсіювання шляхом розташування витків вихідної частини обмотки АТН у певній частині її перерізу.

Одержання (вперше) такого результату може бути використано для вибору нових схем розташування частин обмоток АТН, а також для вибору розташування зв'язуючих обмоток в каскадних трансформаторах.

Оскільки вплив потоків розсіювання поблизу ярем магнітопроводу («ярмового» розсіювання) для високовольтних АТН є додатнім (~ 10%) до «стрижневого» розсіювання, запропоновано наближене врахування внеску «ярмового» розсіювання з використанням комплексної вісесиметричної моделі. В рамках даної комплексної

суттєвим для перших шарів обмотки, де, зазвичай, розташовують вихідну частину обмотки АТН. Для силових АТ вплив ємнісних складових струмів є незначним, оскільки вони є малими, у порівнянні з номінальними струмами в обмотках, проте, в режимі холостого ходу (до якого наближені режими роботи високовольтних автотрансформаторів напруги) ємнісні складові струмів можуть набувати суттєвого впливу на розподіл напруги по витках вихідної частини обмотки АТН. Як приклад, в автотрансформаторі напруги класу 10 кВ (за розділом 4) розподіл ємнісної складової струму по витках першого шару обмотки I_{Ci} має вид, представлений на рис. 3.

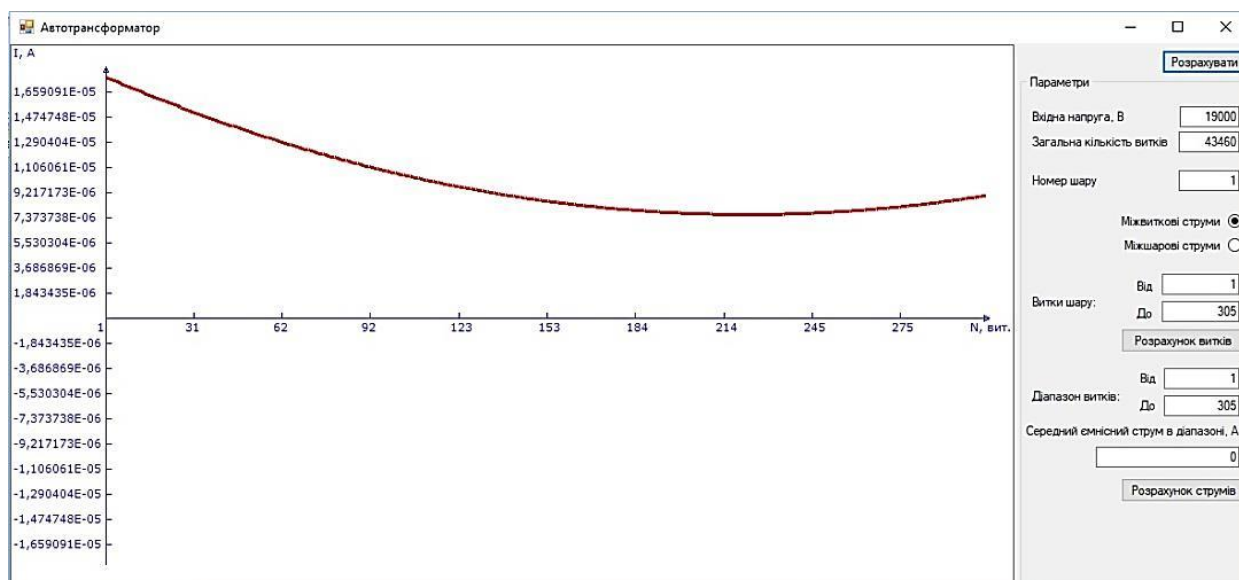


Рисунок 3 – Розподіл ємнісного струму у витках першого шару обмотки високовольтного АТН класу 10 кВ (за розділом 4) при його вхідній напрузі 19 кВ

При цьому, векторні діаграми напруг та струмів у витках обмотки АТН без врахування та з врахуванням ємнісних складових струмів відповідатимуть рис. 4а та рис. 4б, відповідно.

З урахуванням впливу ємнісної складової струму I_{Ci} , в дисертаційній роботі запропоновано формули для розрахунку складових напруги на i -витку обмотки АТН в режимі холостого ходу:

$$U_{ix} = I_0 \cdot R_i - EPC_i \cdot \sin \varphi - Up_{ci} \cdot \sin \varphi + Ua_{ci} \cdot \cos(\pi - \varphi); \quad (4)$$

$$U_{iy} = I_0 \cdot Xs_i - EPC_i \cdot \cos \varphi - Up_{ci} \cdot \cos \varphi + Ua_{ci} \cdot \sin(\pi - \varphi), \quad (5)$$

де I_0 – значення струму холостого ходу; R_i – активна складова опору та Xs_i – реактивна складова опору, викликана розсіюванням для i -го витка обмотки; $Ua_{ci} = I_{Ci} \cdot R_i$; $Up_{ci} = I_{Ci} \cdot Xs_i$, φ – кут відставання основного магнітного потоку Φ_0 в магнітопроводі від МРС. Відповідно, кут між напругою та струмом холостого ходу I_0 у i -витку та модуль цієї напруги визначатимуться за формулами:

$$\varphi_{Ui} = \arctg\left(\frac{U_{iy}}{U_{ix}}\right); U_i = \sqrt{U_{iy}^2 + U_{ix}^2}.$$

Підсумовування складових напруги по виткам (групам витків) обмотки високовольтного АТН (4), (5) дозволяє визначати значення його масштабного

Для високовольтного автотрансформатора напруги, заживлюваного зі сторони високовольтної обмотки напругою \dot{U}_{ex} , деталізована система рівнянь перетворюється до виду:

$$\dot{U}_{i1} = \left(j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_1 \cdot (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_3 \cdot M_{i3} \right) \cdot W_{i1}; \quad (6)$$

$$\dot{U}_{s3} = \left(j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_3 \cdot (r_{s3} + j \cdot \omega \cdot L_{s3}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{s1} \right) \cdot W_{s3}; \quad (7)$$

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot \sum_{p+1}^n (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_{i1} + \dot{I}_3 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_{p+1}^n M_{i3} \cdot W_{i1}; \quad (8)$$

$$\dot{U}_3 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_3 + \dot{I}_3 \cdot \sum_1^p (r_{s3} + j \cdot \omega \cdot L_{s3}) \cdot W_{s3} + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_1^p M_{s1} \cdot W_{s3}; \quad (9)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_3 \cdot W_3}{\dot{R}_m}; \quad (10)$$

$$\dot{I}_{3н} = \frac{\dot{U}_3}{\dot{Z}_H}; \quad (11)$$

$$\dot{I}_{3н} + \dot{I}_3 = \dot{I}_1; \quad (12)$$

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_3 = \dot{U}_{ex}, \quad (13)$$

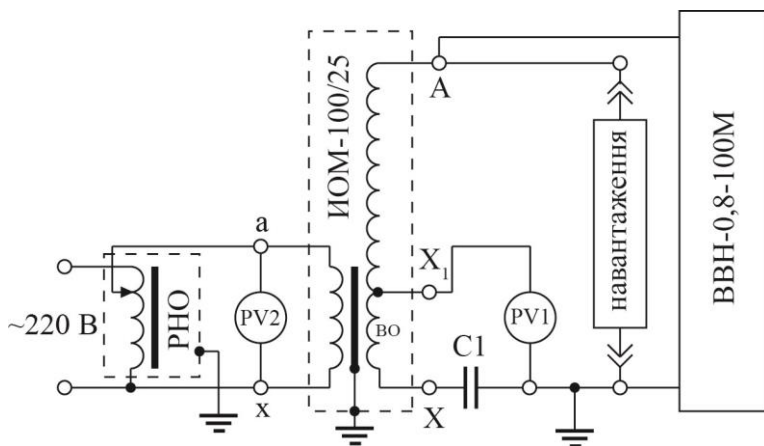


Рисунок 5 – Схема дослідження характеристик високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з вихідною вимірювальною обмоткою ВО: РНО – регулюючий автотрансформатор; ИОМ-100/25 – досліджуваний трансформатор; ВВН-0,8-100М – еталонний вимірювач високої напруги; PV1 – вольтметр, приєднаний до виходу вимірювальної обмотки; PV2 – вольтметр вхідної низьковольтної обмотки трансформатора; навантаження – змінюване за умовами експерименту; С1 – коригуюча ємність

де $\dot{\Phi}$, \dot{R}_m – основний магнітний потік та магнітний опір магнітопроводу; ω – кутова частота; \dot{Z}_H – комплексний опір навантаження (вольтметра або пристрою, приєднуваного до вихідної частини обмотки АТН з кількістю витків W_3); $s = 1, 2 \dots p$ – порядковий номер групи витків вихідної частини та $i = p + 1, p + 2, \dots n$, відповідно, для вхідної частини обмотки АТН; $\dot{I}_{3н}$ – струм у навантаженні; \dot{U}_3 – вихідна напруга на навантаженні; \dot{I}_1 – струм у вхідній частині обмотки

АТН; \dot{i}_3 – струм у вихідній частині обмотки АТН; \dot{U}_{i1} – напруга на i -й групі витків вхідної частини обмотки АТН з кількістю витків в групі W_{i1} ; \dot{U}_{s3} – напруга на s -й групі витків вихідної частини обмотки АТН з кількістю витків в групі W_{s3} ; r_{i1} , r_{s3} – активні опори одиничних витків, розташованих у геометричних центрах відповідних груп; L_{i1} – часткова індуктивність розсіювання, яка дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{i1} , зчепленому з $i1$ -витком вхідної частини обмотки при протіканні по ній струму 1 А; L_{s3} – часткова індуктивність розсіювання, яка дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{s3} , зчепленому з $s3$ -витком вихідної частини обмотки при протіканні по ній струму 1 А; M_{i3} – часткова взаємоіндуктивність розсіювання, яка дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{i3} , зчепленому з $i1$ -витком вхідної частини обмотки, при протіканні по вихідній частині обмотки струму 1 А; M_{s1} – часткова взаємоіндуктивність розсіювання, яка дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{s1} , зчепленому з $s3$ -витком вихідної частини обмотки, при протіканні по вхідній частині обмотки автотрансформатора струму 1 А;

$$W_3 = W_{13} + W_{23} + \dots + W_{s3} + \dots + W_{p3}; \quad (14)$$

$$W_1 = W_{(p+1)1} + W_{(p+2)1} + \dots + W_{i1} + \dots + W_{n1}, \quad (15)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{13} + \dot{U}_{23} + \dots + \dot{U}_{s3} + \dots + \dot{U}_{p3}, \quad (16)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{(p+1)1} + \dot{U}_{(p+2)1} + \dots + \dot{U}_{i1} + \dots + \dot{U}_{n1}. \quad (17)$$

Вирішення системи рівнянь (6 – 13), з урахуванням (14 – 17), вперше дозволяє визначати характеристики автотрансформатора, відповідно, з деталізацією розподілу напруги по витках (групах витків) обмотки, що дає можливість з високою точністю розраховувати його характеристики трансформації напруги при номінальних коефіцієнтах масштабного перетворення до 100000 одиниць і більше.

В цьому ж розділі роботи вперше запропоновано використовувати коригуючу ємність в колі високовольтної обмотки, в якій відбувається автотрансформаторне перетворення напруги, для випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з метою компенсації «надлишкової» реактивної складової спаду напруги у її вихідній частині («вимірювальній обмотці»).

Метод компенсації «надлишкового» спаду напруги на вихідній частині високовольтної обмотки («вимірювальній обмотці») високовольтного випробувального трансформатора за допомогою коригуючої ємності відображений у патенті України на винахід «Високовольтний випробувальний трансформатор напруги» № 102864 авторів Бржезицького В. О., Гарана Я. О. у 2013 році.

В четвертому розділі описуються експериментальні дослідження та впровадження, виконані за теоретичними положеннями, розробленими в другому та третьому розділах дисертаційної роботи.

Виконано експериментальну перевірку викладених у другому розділі дисертаційної роботи теоретичних положень щодо розрахунку за допомогою моделювання розподілу електричних та магнітних полів на ПК – індуктивності розсіювання та ємнісних струмів в АТН. При цьому, показано, що

використання замість моделі «стрижневого» розсіювання запропонованої комплексної моделі (в якій додатково враховано вплив «ярмового» розсіювання) забезпечує суттєве покращення співпадіння розрахункових значень приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання з експериментально визначеними її значеннями.

За темою, зареєстрованою за номером Державної реєстрації 0113U008072, виконані розрахунки та виготовлений високовольтний автотрансформатор напруги класу 10 кВ (з максимальною робочою напругою 19 кВ), призначений для роботи у складі Вторинного еталона високої напруги змінного струму частоти 50 Гц класу 110 кВ. Даний автотрансформатор здатний забезпечити 9 різних масштабних коефіцієнтів перетворення високої вхідної напруги (3 кВ, 6 кВ, 10 кВ) при номінальних вихідних напругах 100/3 В, 100/√3 В, 100 В в діапазонах номінальних вхідних напруг від 80% до 190% від номінальної. При цьому, похибка напруги для всіх номінальних коефіцієнтів ділення та всіх нормованих режимів роботи АТН не перевищує 0,05%, а кутова похибка не перевищує однієї кутової хвилини (за результатами проведеної державної метрологічної атестації).

Зовнішній вид даного високовольтного автотрансформатора напруги



Рисунок 6 – Зовнішній вид високовольтного автотрансформатора напруги класу 10 кВ з боку відводів

представлений на рис. 6, при цьому він має на 40% зменшену масу, на 5% збільшену напругу та в 4 рази зменшене значення похибки напруги, порівняно з прототипом – трансформатором И-50.

За теоретичними матеріалами розділу 3 дисертації та даними обміру активної частини трансформатора ИОМ-100/25 були розраховані значення напруги на його «вимірювальній обмотці» при різних типах навантаження трансформатора та визначені

похибки вимірювання високої напруги (за показами «вимірювальної обмотки») з урахуванням коригуючої ємності, запропонованої в роботі, та без врахування коригуючої ємності.

Порівняння розрахованих значень похибки визначення високої випробувальної напруги трансформатора ИОМ-100/25 (за «вимірювальною обмоткою») з експериментальними даними за ємнісного навантаження наведені на рис. 7а.

На рис. 7б показані аналогічні розраховані та експериментальні дані похибки визначення випробувальної напруги ИОМ-100/25 (за його «вимірювальною обмоткою») при використанні в схемі трансформатора

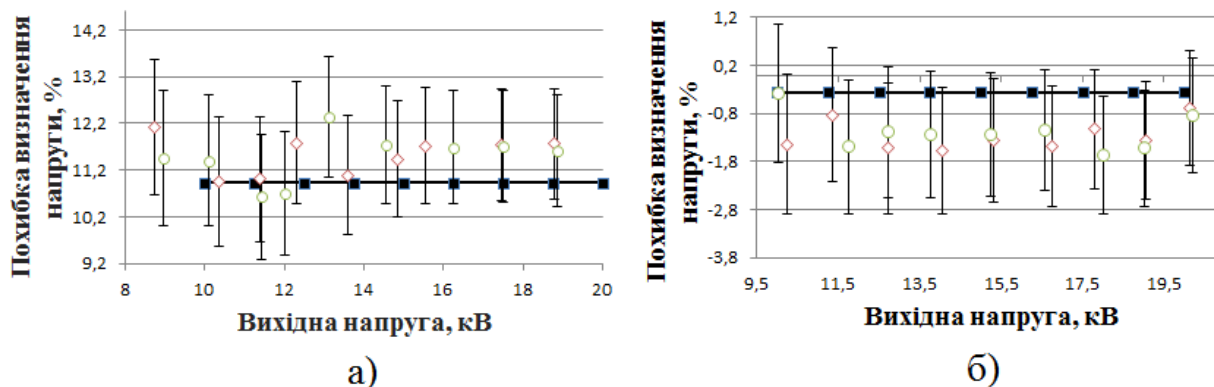


Рисунок 7 – Порівняння результатів розрахунку похибки визначення високої випробувальної напруги за допомогою «вимірювальної обмотки» трансформатора ИОМ-100/25 з двома рядами експериментальних даних (ємнісне навантаження 15,4 нФ): а) без коригування; б) з використанням коригуючої ємності 137 мкФ

коригуючої ємності (за рис. 5) $C1 = 137 \text{ мкФ}$ при ємнісному навантаженні.

Наведені в розділі 4 дисертації експериментальні дані дослідження високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з «вимірювальною обмоткою» підтверджують одержані результати розрахунків характеристик його режимів. Також в роботі показано, що використання коригуючої ємності $C1$ за рис. 5 практично не впливає на похибку визначення високої випробувальної напруги ИОМ-100/25 при активно-індуктивному навантаженні та в режимі холостого ходу.

За матеріалами дисертаційної роботи розроблений, виготовлений, метрологічно атестований (ДП «Укрметртестстандарт») та впроваджений в Київських МЕМ ЦЕС ДП «НЕК «Укренерго» високовольтний випробувальний трансформатор на напругу до 180 кВ (зі зменшеними масогабаритними показниками) з високовольтною обмоткою, в якій використовується автотрансформаторне перетворення напруги, що дозволяє вимірювати вихідну напругу його високовольтної обмотки з нормованою точністю в діапазоні зміни його номінального навантаження від 0 до 8000 Вт.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розвитку методів математичного моделювання процесів автотрансформаторного перетворення високої напруги, визначення його характеристик на основі проведення за допомогою ПК чисельних розрахунків електричних та магнітних полів та удосконалення відповідних високовольтних вимірювальних пристроїв, у тому числі, досягнення суттєвого підвищення їхньої точності. Отримані результати роботи, в сукупності, мають істотне значення для розвитку техніки сильних електричних і магнітних полів та вимірювань високих напруг.

1. Еволюційний розвиток існуючих досліджень високовольтних трансформаторів напруги позбавив на даний час уваги важливий напрямок розвитку високовольтної вимірювальної техніки, що базується на автотрансформаторному масштабному перетворенні високої напруги. Можливість використання для вимірювання високої напруги автотрансформаторного перетворення відзначена у стандартах ДСТУ ІЕС 60044-2, ДСТУ EN 61869-3.

2. Особливості виконання високовольтних автотрансформаторів напруги не дозволяють використовувати поширені формули розрахунку параметрів магнітного поля розсіювання, які застосовуються для силових автотрансформаторів за звичайної умови рівності нулю сумарної магніторушійної сили частин обмоток. Проте, перспективи роботи як високовольтних автотрансформаторів напруги, так і трансформаторів напруги в концепції «Smart Grid» вимагають переходу до розгляду режимів їх холостого ходу (або наближених до них режимів).

3. Вперше запропоновано метод вибору місця розташування вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги, який дозволяє на етапі математичного моделювання одержувати задане значення його приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання. Запропонований метод може також бути поширеним на трансформатори напруги.

4. Удосконалено математичну модель розсіювання магнітного поля в високовольтному автотрансформаторі напруги, що дозволяє визначати дольові коефіцієнти впливу «стрижневого» та «ярмового» розсіювання. Виконано порівняння експериментально одержаних даних індуктивності розсіювання трансформатора напруги з результатами теоретичних розрахунків за запропонованою комплексною вісесиметричною моделлю, а також з тривимірною моделлю. Результати порівняння дозволяють рекомендувати для інженерних розрахунків індуктивності розсіювання високовольтних автотрансформаторів напруги запроповану комплексну модель з використанням сучасних програмних продуктів.

5. Отримав подальший розвиток аналіз впливу ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги, які розглядаються як малі збурення для автотрансформатора класу 10 кВ, однак для автотрансформаторів класу 110 кВ і вище можуть бути порівняні зі струмом холостого ходу. Виявлено нелінійний характер розподілення ємнісної складової струму в витках обмотки та запропоновано векторну діаграму для визначення впливу цієї складової на розподіл напруги по витках обмотки високовольтного автотрансформатора напруги.

6. Вперше розроблено математичну модель високовольтного автотрансформатора напруги, в якій у систему рівнянь уведено використання часткових власних та взаємних індуктивностей розсіювання, що, на відміну від існуючих моделей, дозволяє визначати розподіл напруги по окремих витках (або групах витків) обмотки.

7. Вперше визначено особливості режимів високовольтних випробувальних трансформаторів, в яких відбувається комплексне

трансформаторне та автотрансформаторне перетворення високої напруги, при якому з'являються аномально великі похибки вимірювання (з використанням вихідної частини високовольтної обмотки) високої випробувальної напруги при суттєвому ємнісному навантаженні. Запропоновано метод коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора з використанням автотрансформаторного перетворення у високовольтній обмотці шляхом компенсації «надлишкової» індуктивності розсіювання вимірювальної обмотки за допомогою послідовного приєднання до її кола коригуючої ємності, на що одержано патент України на винахід «Високовольтний випробувальний трансформатор напруги».

8. Створено за теоретичними матеріалами дисертаційної роботи високовольтний вимірювальний автотрансформатор класу напруги 10 кВ з максимальною робочою напругою 19 кВ класу точності 0,05, впроваджений для роботи у складі Вторинного еталона України змінного струму частоти 50 Гц класу 110 кВ. Результати розрахунків характеристик високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги підтверджені даними державної метрологічної атестації.

9. Розроблено та виготовлено високовольтний випробувальний трансформатор на напругу 180 кВ, призначений для випробування високовольтної ізоляції у відповідності до НПАОП 40.1-1.07-01, зі зменшеними масогабаритними показниками, з високовольтною обмоткою, що використовує автотрансформаторне перетворення напруги, за допомогою якої можна визначати високу випробувальну напругу на об'єкті випробувань з показниками точності за стандартом ІЕС 60060-2 при зміні номінальної потужності його навантаження від 0 до 8000 Вт.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гаран, Я. О. Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних трансформаторів напруги за допомогою програм, що використовують метод скінченних елементів / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. М. Десятов // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – с.61-63. (База даних Scopus). *Здобувачем запропоновано нові математичні вирази для розрахунку приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання. Чисельними розрахунками визначені координати розташування витків вихідної частини обмотки автотрансформатора за заданої індуктивності розсіювання.*

2. Гаран, Я. О. Аналіз ємнісних струмів в обмотці високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4. – с. 70-76. (Бази даних Index Copernicus, РИНЦ). *Здобувачем виконано визначення впливу ємнісних складових струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги на розподіл напруги по витках.*

3. Гаран, Я. О. Коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 3. – с. 41-46. (Бази даних Index Copernicus, РИНЦ). *Здобувачем одержано математичні вирази для*

коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора та виконано порівняння розрахунків за цими виразами з експериментально одержаними даними.

4. Гаран, Я. О. Деталізація рівнянь трансформатора до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 1. – с. 32-37. (Бази даних Index Copernicus, РИНЦ). *Здобувачем обґрунтовано введення в систему рівнянь трансформатора параметрів часткових власної та взаємної індуктивності розсіювання витків обмоток.*

5. Haran, Ya. Mathematical model of high-voltage instrument autotransformer intended for use in Smart Grid networks / V. Brzhezitsky, Ya. Haran, Ye. Trotsenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – № 4/1 (36). – p. 50-54. (Бази даних Index Copernicus, РИНЦ). *Здобувачем виконано удосконалення системи рівнянь автотрансформатора напруги з використанням часткових власних та взаємних індуктивностей розсіювання витків обмотки.*

6. Гаран Я. О. Визначення картини поля обмоток високовольтного трансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – с. 21-23. (База даних Index Copernicus, РИНЦ). *Здобувачем запропоновані аналітичні вирази, що дозволяють перевіряти адекватність результатів чисельних розрахунків магнітного поля розсіювання ТН.*

7. Гаран, Я. О. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, М. Ю. Лапоша // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 6. – с. 50-54. (Бази даних Index Copernicus, РИНЦ). *Здобувачем виконано чисельні розрахунки магнітного поля розсіювання в циліндричній системі координат для вісесиметричної моделі котушки.*

8. Гаран Я. О. Трансформування вищих гармонічних складових напруги електромагнітними трансформаторами (експериментальне дослідження) / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Наукові праці НУХТ. – 2013. – № 49. – с. 98-103. (База даних Index Copernicus). *Здобувачем виконані експериментальні дослідження параметрів масштабного перетворення напруги високовольтного ТН.*

9. Гаран, Я. О. Особливості характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №1. – с. 36-37. (Бази даних Index Copernicus, РИНЦ). *Здобувачем виконані експериментальні дослідження автотрансформаторного перетворення напруги у високовольтному випробувальному трансформаторі.*

10. Патент України на винахід № 102864, МПК H01F 38/20, H01F 38/24. Високовольтний випробувальний трансформатор напруги / Бржезицький В. О., Гаран Я. О.; заявник та власник патенту: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № 201103746; заявл. 28.03.2011; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 4 с. *Здобувачем запропоновано використання*

коригуючої ємності в колі високовольтної обмотки випробувального трансформатора.

11. Анохин Ю. Л. Испытательные трансформаторы с требованиями точности измерения высокого напряжения / Ю. Л. Анохин, В. А. Бржезицкий, Я. А. Гаран, В. В. Копшин // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VII наук.-практ. конф. – К.: АВЕГА. – 2010. – с. 81-85. *Здобувачем виконано експериментальні дослідження автотрансформаторного перетворення високої напруги експериментального зразка випробувального трансформатора.*

12. В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран Експериментальна перевірка методу розрахунку індуктивності розсіювання високовольтних трансформаторів напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2014. – с. 326-328. *Здобувачем запропоновано використання дольових часток «стрижневої» та «ярмової» складових магнітного поля розсіювання для вісесиметричних моделей в циліндричній системі координат.*

13. В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран До розрахунку індуктивності розсіювання високовольтного трансформатора напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2013. – с. 480-484. *Здобувачем запропоновано удосконалення математичної моделі стрижневої складової магнітного поля розсіювання трансформатора напруги в циліндричній системі координат.*

14. Гаран Я. О. Коректування високовольтного випробувального трансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2009. – Т 2. – 453 с. – с. 280-282. *Здобувачем виконаний аналіз експериментально одержаних даних коригування похибки напруги високовольтного випробувального трансформатора.*

15. Гаран Я. О. До розрахунку магнітного поля кругового контуру зі струмом з урахуванням феромагнітного осердя / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. М. Десятов // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2009. – Т2, с. 283-285. *Здобувачем запропоновано використання аналітичних виразів напруженості магнітного поля кругового витка зі струмом для порівняння з результатами чисельних розрахунків вісесиметричних моделей в циліндричній системі координат.*

16. Гаран Я. О. Тестування аналітичних виразів складових напруженості магнітного поля кругового витка зі струмом / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. П. Дацюк // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2010, с. 483-485.

Здобувачем виконано порівняння розрахованих за запропонованими формулами значень векторного потенціалу магнітного поля кругового витка зі струмом у часткових похідних з відомими виразами.

17. Гаран, Я. А. Испытательный трансформатор напряжением 180 кВ с гарантированной точностью его измерения / [В. Б. Абрамов, Ю. Л. Анохин, В. А. Бржезицкий, Я. А. Гаран и др.] // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. – 2008. – Ч. 5. – с. 100-101. *Здобувачем виконано підготовку експериментального зразка високовольтного випробувального трансформатора до проведення його метрологічної атестації та виконано обробку її результатів.*

АНОТАЦІЇ

Гаран Я. О. Удосконалення високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2019.

У дисертації вирішено актуальне наукове завдання розвитку методів математичного моделювання процесів автотрансформаторного перетворення високої напруги, визначення його характеристик на основі використання чисельних розрахунків електричних та магнітних полів та удосконалення відповідних високовольтних вимірювальних пристроїв.

Деталізовано системи рівнянь високовольтних автотрансформаторів напруги та випробувальних трансформаторів до рівня одиничних витків (або груп витків) обмоток, що дозволяє з високою точністю розраховувати їх характеристики трансформації напруги при коефіцієнтах масштабного перетворення до 100000 одиниць і більше.

Виявлено не пояснену раніше зміну масштабного коефіцієнта у високовольтних випробувальних трансформаторах з комплексним трансформаторним та автотрансформаторним перетворенням напруги за різного характеру навантаження та запропоновано спосіб коригування даної зміни.

За обґрунтованими в дисертації теоретичними положеннями розроблено, виготовлено та метрологічно атестовано нові зразки високовольтної вимірювальної техніки, в яких використовується автотрансформаторне перетворення напруги.

Ключові слова: автотрансформаторне перетворення напруги, випробувальний трансформатор, високовольтний автотрансформатор напруги, коефіцієнт масштабного перетворення напруги, математична модель, похибка вимірювання напруги.

Гаран Я. А. Усовершенствование высоковольтных измерительных устройств, использующих автотрансформаторное преобразование напряжения. На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2019.

В диссертации решена актуальная научная задача развития методов математического моделирования процессов автотрансформаторного преобразования высокого напряжения, определения его характеристик на основе использования численных расчетов электрических и магнитных полей и усовершенствования соответствующих высоковольтных измерительных устройств.

Детализированы системы уравнений высоковольтных автотрансформаторов напряжения и испытательных трансформаторов до уровня единичных витков (или групп витков) обмоток, что позволяет с высокой точностью рассчитывать их характеристики трансформации напряжения при коэффициентах масштабного преобразования до 100000 единиц и более.

Обнаружено не объясненную ранее причину изменения коэффициента масштабного преобразования в высоковольтных испытательных трансформаторах с комплексным трансформаторным и автотрансформаторным преобразованиями напряжения при различном характере нагрузки и предложен способ корректировки изменения этого коэффициента.

С помощью обоснованных в диссертации теоретических положений разработаны, изготовлены и метрологически аттестованы новые образцы высоковольтной измерительной техники, в которых используется автотрансформаторное преобразования напряжения.

Ключевые слова: автотрансформаторное преобразования напряжения, высоковольтный автотрансформатор напряжения, испытательный трансформатор, коэффициент масштабного преобразования напряжения, математическая модель, погрешность измерения напряжения.

Haran Ya. O. Improvement of high-voltage measuring devices using autotransformer voltage conversion. Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.09.13 "Technics of strong electric and magnetic fields". National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis agreed relevant scientific task of the development of mathematical modeling methods of high-voltage autotransformer conversion processes, determine its characteristics through the use of numerical calculation of electric and magnetic fields and the corresponding high-voltage measuring devices, including the achievement of a significant improvement in their accuracy.

In the first chapter of the thesis performed a review of the literature related to the subject of research. A review of the literature and current scientific research has

allowed revealing a number of outstanding issues relating to the autotransformer voltage conversion in high voltage measuring devices.

In the second chapter of the thesis expounded the scientific achievements of the author concerning the autotransformer conversion of high voltage in modes close to the idling mode, the influence of capacitive currents that occur in multilayer windings of high-voltage measuring autotransformers, the voltage distribution along the winding turns. The method that allows to calculate the leakage inductance of the winding by simulation of the high-voltage autotransformer active part in the cylindrical coordinate system, excluding components of leakage flux linkage in rod magnetic core section, which allows to determine the present equivalent leakage inductance of the high-voltage measuring autotransformers windings as the difference values of one order (in relation to the value that is defined). Method for determination of those turns location coordinates of the low-voltage winding part of high-voltage autotransformer, which is based on the achievement of predetermined set value given the equivalent leakage inductance of its winding, that need to get for the high-voltage autotransformer that is projected. Mathematical model of high-voltage autotransformer in the cylindrical coordinate system is improved by taking into account the components of magnetic leakage flux linkage in different parts of the plane of the winding cross section. The use of fractional coefficients "rod" and "yoke" leakage flux linkage is suggested, allowing closer compliance with the parameters of the leakage flux linkage of the complex axisymmetric model's winding and the three-dimensional model of high-voltage autotransformer. The influence analysis of capacitive currents in high-voltage windings of autotransformers on voltage distribution along the turns of their layers is performed. Found their nonlinear character and vector diagram for calculating the contribution of capacitive current in voltage distribution along the turns of high-voltage measuring autotransformer.

In the third section of the dissertation examined the theory of the test transformers that use complex transformer and autotransformer voltage conversion, for example the high-voltage testing transformer with high-voltage winding, built by the scheme of autotransformer voltage conversion. Special attention is paid to the issue of autotransformer high-voltage conversion at different test load of this transformer. Defined features modes such high-voltage test transformer when significant capacitive load and the proposed method of correcting error of autotransformer high-voltage conversion in them. Added to the theory of autotransformers the equation systems, that allowed determining the voltage distribution in windings at the level of the single turns or groups of turns.

In the fourth chapter of the thesis performed a comparison of the characteristics calculation results of autotransformer high-voltage transformation by the theoretical provisions set out in the second and third sections of this thesis, with the results of experimental research. Performed a comparison of the experimentally obtained data of voltage distribution along winding turns of 10 kV reference high-voltage autotransformer with the results of theoretical calculations on the proposed in thesis complex mathematical model of the windings. Performed a comparison of the experimentally obtained data, coefficients of voltage scale conversion of high-voltage testing transformer with winding, built by the scheme of autotransformer voltage

conversion, with different types of it loads (including using the proposed method, the adjustment factor for autotransformer high-voltage conversion) with the results of theoretical calculations made by the autotransformer system of equations in a dissertation.

Keywords: autotransformer high-voltage conversion, capacitive current, error of autotransformer high-voltage conversion, high-voltage measuring autotransformer, high-voltage test transformer, leakage inductance, mathematical model, voltage scale conversion.

Підписано до друку 25.02.2019 р. Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – цифровий. Ум. друк. арк. 1,63. Наклад 150 пр.
Зам. № 19-57

ФО-П Маслаков Руслан Олексійович
Свідоцтво ДК № 4726 від 29.05.2014 р.
Видавничий дім «Освіта України»
04136, Київ, вул. Маршала Гречка, 13, оф. 808
тел. (095) 699-25-20

