

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Ганус Олексій Іванович

УДК 621.314.222.8

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ В
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ**

Спеціальність 05.14.02 - електричні станції, мережі і системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2008

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківській національній академії міського господарства
МОН України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Говоров Пилип Парамонович

Харківська національна академія
міського господарства, м. Харків,
професор кафедри світлотехніки
та джерел світла

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Назаров Володимир Васильович

ВАТ «Укрелектроапарат», м. Хмельницький,
директор служби науково-дослідних робіт

кандидат технічних наук, доцент,
старший науковий співробітник

Тугай Юрій Іванович

Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ,
провідний науковий співробітник
відділу оптимізації систем електропостачання

Захист відбудеться “ 27 ” березня 2008 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої
ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”
за адресою : 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету
“Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “ 20 ” лютого 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Мінченко А.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку з впровадженням ринкових відносин в Україні та в електроенергетиці зокрема особлива увага нині приділяється питанням контролю та управління електропостачанням та електроспоживанням. Якість вирішення означеної задачі залежить від надійності всієї системи контролю та управління, в цілому, та її елементів окремо. Одним з найбільш вразливих елементів в електричних мережах (ЕМ) з ізольованою нейтраллю є трансформатори напруги (ТН), які використовуються в схемах контролю ізоляції, релейного захисту та обліку електричної енергії. Особливістю цих мереж є те, що практично всі лінії електропередачі в них є повітряними, вони прокладені через лісові смуги, а підстанції (ПС) працюють без чергового персоналу.

На користь актуальності теми досліджень вказує той факт, що з 362 ТН, встановлених у АК «Харківобленерго», за період 1999 - 2003 рр. 232 пошкоджувались. Відмови ТН почали збільшуватися з 1998 року, коли в енергетиці загострилися проблеми виконання робіт, пов'язаних із заміною ізоляторів та плановим розчищенням трас повітряних ліній. Крім того, з 1990 року через труднощі фінансового характеру замість придбання нових ТН вони стали замінятися такими, що пройшли ремонт в умовах майстерень.

Питанням підвищення надійності роботи ТН присвячено чимало робіт. Перш за все це роботи А.В. Журахівського, В.Г. Кузнецова, М.Х. Зихермана, В.Ф. Сивокобиленка, Б.К. Нугера та інших. За результатами проведених досліджень запропоновано способи та технічні засоби підвищення надійності роботи ТН. Застосування цих заходів дозволило підвищити надійність експлуатації трансформаторів напруги на окремих ділянках мереж напругою 110/35/10 кВ, але повною мірою задачу підвищення надійності роботи електричних мереж не вирішено. Тому зазначена вище проблема зменшення пошкоджуваності ТН, яка становить напрямок дисертаційних досліджень, є актуальною науковою задачею та має важливе технічне та господарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі світлотехніки та джерел світла ХНАМГ. Здобувач як виконавець брав участь у реалізації інвестиційних програм АК «Харківобленерго» на 2004, 2005, 2006 і 2007 роки (затверджені постановами Національної комісії регулювання електроенергетики України № 1494 від 31.12.03, № 311 від 29.04.05, № 1262 від 28.12.05, № 1641 від 12.12.06), програми розвитку електричних мереж напругою 35-110 (154) кВ і визначення обсягів реконструкції електричних мереж напругою 0,4 – 10 кВ на 2007 – 2011 роки (затверджена розпорядженням Національної комісії регулювання електроенергетики України № 727-р від 11.09.07).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення надійності роботи трансформаторів напруги у складі розподільчих електричних мереж 6(10)-35 кВ за рахунок виявлення причин виникнення ферорезонансних процесів (ФРП) у трансформаторах напруги, їх попередження й усунення.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

2

1. Встановити причини пошкоджуваності трансформаторів напруги 6(10)-35 кВ в електричних мережах з ізольованою нейтраллю, що пов'язані зі зміною їх магнітних характеристик.

2. Встановити характер зміни магнітних характеристик трансформаторів напруги в процесі експлуатації.

3. Запропонувати математичну модель розподільчих електромереж, використання якої дозволить уточнити межі областей можливого згасаючого й незгасаючого ФРП, що виникають в електричних мережах з ізольованою нейтраллю.

4. Дослідити на фізичній та натурній моделях діючих електричних мереж перехідні процеси під час заземлення однієї з фаз та експериментально підтвердити отримані результати математичних досліджень для різних конструкцій ТН.

Об'єкт дослідження – процеси в електричних мережах з ізольованою нейтраллю з трансформаторами напруги різних типів.

Предмет дослідження – підвищення надійності експлуатації електричних мереж з ізольованою нейтраллю за рахунок зменшення пошкоджуваності трансформаторів напруги.

Методи дослідження. Рішення поставлених в дисертаційній роботі задач досягнуте на базі фундаментальних положень електротехніки, теорії електричних мереж та математичного аналізу, а при встановленні причин пошкоджуваності трансформаторів напруги - математичної статистики та теорії надійності. При встановленні характеру зміни магнітних характеристик трансформаторів напруги в процесі експлуатації використані методи аналізу лінійних і нелінійних електричних кіл, апроксимації нелінійних характеристик, а при побудові математичної моделі електромереж різних класів напруг - математичного моделювання. Під час встановлення меж областей можливого згасаючого й незгасаючого ферорезонансних процесів - чисельних методів інтегрування диференціальних рівнянь з використанням комп'ютерного моделювання. Під час дослідження перехідних процесів при заземленні однієї з фаз у діючих електричних мережах та в лабораторних умовах - натурального та фізичного експериментів.

Достовірність одержаних теоретичних результатів підтверджується експериментальними дослідженнями.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше встановлено явище зміни характеристик намагнічення трансформаторів напруги в процесі їх експлуатації, врахування якого дало змогу виявити можливі причини виникнення ферорезонансних процесів та визначити шляхи зниження їх впливу, і на цій основі забезпечити підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю;

- отримала подальший розвиток математична модель електричної мережі з трансформато-

рами напруги. Від існуючих вона відрізняється можливістю врахування змінності параметрів трансформаторів напруги, що дозволяє уточнити межі зон, в яких виникають ферорезонансні процеси в електричних мережах;

- вдосконалена аналітична залежність, яка описує магнітні характеристики трансформаторів напруги. Вона відрізняється від існуючих врахуванням змін у розташуванні характеристик в залежності від числа ремонтів, що дало змогу визначити

3

загальні закономірності зміни характеристик у процесі експлуатації й уточнити межі областей згасаючого й незгасаючого ферорезонансних процесів;

- вперше на основі натурних досліджень процесів у діючих електричних мережах двох ступенів номінальних напруг з трансформаторами напруги експериментально підтверджено, що головною причиною пошкодження трансформаторів напруги в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю є виникнення ферорезонансних процесів у них, що дало змогу визначити область застосування методів та способів захисту трансформаторів напруги, що пройшли відновлювальний ремонт, від пошкоджень у процесі експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи використовуються в електроенергетиці для підвищення надійності роботи електричних мереж.

На основі уточнення меж областей згасаючого й незгасаючого ферорезонансних процесів, що виникають у розподільчих електричних мережах з номінальною напругою 6(10)-35 кВ, розроблено рекомендації щодо вибору типів трансформаторів напруги для електричних мереж з ізолюваною нейтраллю.

Запропоновані способи подавлення ферорезонансних процесів в електричних мережах з трансформаторами напруги засновані на зміні величини активного опору в їх вторинних колах або зміні ємності електричної мережі, що підвищують надійність роботи як трансформаторів напруги, так і електричних мереж з ізолюваною нейтраллю в цілому.

На базі розробленої методики розрахунку областей згасаючого й незгасаючого ферорезонансних процесів у розподільчих електричних мережах з номінальною напругою 6(10)-35 кВ встановлюються параметри електричних мереж, в яких виникають ферорезонансні процеси, та рекомендуються заходи і засоби захисту.

Виявлені закономірності в розташуванні характерних точок магнітних характеристик трансформаторів напруги використовуються у розслідуванні причин пошкоджень трансформаторів напруги під час їх ремонтів в АК «Харківобленерго» (м. Харків), ВАТ «Полтаваобленерго» (м. Полтава) та ВАТ «Львівобленерго» (м. Львів).

Рекомендації з апроксимації нелінійних характеристик гіперболічним синусом при аналізі перехідних процесів запропоновані для використання в НУ «Львівська політехніка» з метою створення програмного забезпечення розрахунків електричних мереж.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення дисертації отримані здобувачем самостійно. Серед них: надана оцінка ролі кожного з чинників, що впливають на пошкоджуваність ТН; розроблено розрахункову схему багаторівневої ЕМ та її елементів для математичної моделі; визначено причини дрейфу магнітних характеристик ТН; проведено статистичний аналіз інформації, на основі якої встановлені причини пошкоджуваності ТН; розроблено програму проведення експериментів та виконано опрацювання їх результатів; встановлено характер протікання перехідних процесів в електричних мережах та їх вплив на пошкоджуваність ТН; надано оцінку критеріям надійності ТН; оцінено вплив параметрів взаємозв'язаних електромереж на характер протікання ферорезонансних процесів; проведено аналіз лабораторних

4

досліджень перехідних процесів ЕМ з реальними ТН та визначені заходи щодо підвищення надійності їх роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: I та II Міжнародних науково-технічних конференціях «Фізичні та технічні проблеми світлотехніки і електроенергетики» (м. Харків, 2003, 2005 рр.), V Міжнародній науково-технічній конференції "Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств" (м. Маріуполь, 2005 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми сучасної електротехніки" (м. Київ, 2004, 2006 рр.); "Силова електроніка й енергоефективність" (м. Алушта, 2004, 2005, 2006, 2007 рр.); науково-технічній конференції "Прогресивні інформаційні й комп'ютерні технології для підвищення ефективності функціонування енергопостачальних компаній й електроенергетичних систем (проблеми, рішення, реалізація, досвід застосування)" (с. Яремче, 2005, 2006 рр.); наукових семінарах «Наукові основи електроенергетики» Наукової Ради НАН України, «Оптимізація функціонування та розвитку електроенергетичних систем» (НУ «Львівська політехніка», м. Львів) та «Оптимізація режимів і параметрів систем електропостачання та освітлення міст» (ХНАМГ, м. Харків).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в 15 публікаціях, з яких 8 статей - у фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 249 сторінок, у тому числі 55 ілюстрацій на 36 сторінках та 17 ілюстрацій за текстом; 15 таблиць на 9 сторінках та 3 таблиці за текстом; 4 додатки на 45 сторінках; 138 найменувань використаних літературних джерел на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлені особливості роботи електричних мереж напругою 6(10)-35 кВ з ізольованою нейтраллю та їх елементів. Розглянуто умови, за яких в ЕМ з ізольованою нейтраллю виникають внутрішні перенапруги та пошкоджуються ТН. Визначена мета роботи, обґрунтована актуа-

льність досліджень, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, наведені відомості про апробацію та публікацію наукових результатів, а також про їх впровадження.

У **першому** розділі за результатами аналізу відомих публікацій:

- визначено, що найнебезпечнішими для ТН є внутрішні перенапруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю, що мають місце під час дугових однофазних замикань на землю (ОЗЗ);

- встановлені основні причини відмов ТН, а саме:

- індуктивний опір обмоток ТН має величину, за якої можливе явище резонансу з ємністю електричної мережі, підключеної до тих самих секцій шин, що й трансформатори напруги;

- ТН є єдиним елементом електричної мережі з ізольованою нейтраллю, що має безпосередній зв'язок із землею;

- визначені види перенапруг, які викликають пошкодження ТН, а саме:

5

- перенапруги вимикань або вмикань ємностей та ненавантажених секцій шин;

- перенапруги резонансного типу, обумовлені появою гармонік за несиметричних замикань;

- ферорезонансні перенапруги;

- розглянуті умови виникнення таких явищ, як автоколивання, субгармонічний ФРП, автопараметричний резонанс, резонанс ненавантаженого ТН із невеликою ємністю ЕМ, послідовний резонанс. Виявлені основні закономірності цих явищ та з'ясовано, яким чином можливе уникнення ФРП, що досягається за рахунок:

- включення в нейтраль силових трансформаторів дугогасних котушок;

- резистивного заземлення нейтралі електромереж;

- постійного або короткочасного включення резисторів у кола основної або додаткової вторинних обмоток ТН;

- заземлення нейтралі ТН через резистори;

- використання ТН типів НАМИ, НТН або НТМ(і).

У **другому** розділі для типової схеми ЕМ напругою 110 – 35 – 6(10) кВ (рис. 1) розроблена математична модель та запропонована розрахункова схема мережі, яка містить джерело живлення, ПЛ 35 – 6(10) кВ, секції збірних шин, силові трансформатори і ТН різних конструкцій. Розроблена розрахункова схема ЕМ (рис.2).

Рис. 1. Принципова схема ЕМ

6

Рис. 2. Розрахункова схема досліджуваної електромережі

7

Зважаючи на те, що виникнення ФРП тісно пов'язане з нелінійними характеристиками ТН, знімалися магнітні характеристики трансформаторів, які проходили капітальний ремонт у майстернях АК «Харківобленерго».

За результатами досліджень цих ТН були виявлені загальні закономірності розташування їх вольтамперних характеристик (рис. 3).

Рис. 3. Вольтамперні характеристики ТН, що пройшли різну кількість відновлювальних ремонтів і мають різний післяремонтний строк експлуатації

На рис. 3 показані межі зон, в яких розташовані характеристики ТН, що не мали раніше пошкоджень (криві 1 і 2), мали одне (криві 3 і 4), два (криві 5 і 6), три (криві 7 і 8), чотири й більше пошкоджень (криві 9 і 10) перед відновленням у майстернях. Зазначені зони розташування характеристик, найчастіше, залежать від строку експлуатації. Так, ТН з більшим строком експлуатації мають магнітну характеристику, розташовану нижче, порівняно з тими ТН, у яких цей термін менший.

Для виявлення закономірностей розташування магнітних характеристик ТН знайдена аналітична залежність, яка відтворює нелінійні магнітні характеристики.

Це було зроблено шляхом порівняння аналітичної $I=f(U, k_1, k_2, \dots, k_n)$ та експериментальної $I=F(u)$ залежностей методом найменших квадратів.

Для апроксимації нелінійних характеристик ТН використовувались такі поліноми:

$$H_{(3)}=f(B)=\sum_{k=0}^1 a_{2k+1} B^{2k+1}, \quad (1)$$

$$H_{(5)}=f(B)=, \quad (2)$$

$$H_{(7)}= \quad (3)$$

і функція гіперболічного синуса

$$H_{(sh)}=. \quad (4)$$

Порівняння апроксимаційних залежностей нелінійних характеристик було здійснено за критерієм мінімуму амплітудної й фазної похибок для кожного зі способів апроксимації.

Аналіз отриманих залежностей дає підставу вважати, що при апроксимації характеристик поліномами третього або п'ятого ступеня неможливо з необхідним ступенем точності відтворити їх в області малих струмів. Крім того, така апроксимація значно спотворює гармонійний спектр

струму. Апроксимація розглянутих характе-

ристик поліномом сьомого ступеня не забезпечує необхідної для дослідження ФРП точності в зоні насичення. Зокрема, неможливо здійснити підбір коефіцієнтів апроксимації, який би дозволив змоделювати реальний нахил характеристик у зоні насичення (особливо тих ТН, які проходили кількарізний цикл «пошкодження - відновлювальний ремонт»). Залежності, які описуються поліномами третього, п'ятого і сьомого ступеня, мають екстремуми й додаткові нульові точки, що призводить до появи похибок, пов'язаних з відхиленнями цих залежностей від реальних кривих.

Крім того, неадекватність апроксимації вольтамперних характеристик ТН вносить похибки в розрахунки струму в нелінійній індуктивності з осередком з електротехнічної сталі. Як показали результати досліджень, з найменшими похибками можливо відобразити характер зміни залежностей, наведених на рис. 3, апроксимацією їх гіперболічним синусом.

У **третьому** розділі були досліджені ФРП в ЕМ, які містять нелінійні елементи.

Отримано вирази, що описують характер протікання процесів при відключенні ТН від джерел постійної й синусоїдної напруг. За їх допомогою здійснений розрахунок можливих перенапруг і тривалості перехідних процесів у кожній зі схем.

Визначено, що ці перенапруги залежать від величини опору навантаження ТН та величини ємностей його обмоток.

Встановлено, що у вторинних обмотках ТН у момент вимикання виникає струм, рівний за величиною тому, що протікає в первинному колі до відключення, помноженому на коефіцієнт трансформації. Цей струм за рахунок великого активного опору навантаження вторинної обмотки ТН створює значні перенапруги.

Досліджено умови, що впливають на тривалість його згасання. Показано, що особливо небезпечним є виникнення ударного струму.

Встановлено, що навіть невеликі постійні напруги, порівняно з номінальною синусоїдною, можуть призвести до значних перенапруг при відключеннях ТН.

Отримані аналітичні залежності для визначення струмів та напруг, що виникають при ОЗЗ в ЕМ з ТН, для випадків, коли його вторинна обмотка розімкнена або замкнена. Визначено вплив включення активного опору навантаження вторинних обмоток ТН на гасіння вільних складових напруги й струму під час перехідного процесу, пов'язаного з ОЗЗ.

Отримані осцилограми (рис. 4) зміни кратності перенапруг залежно від параметрів ЕМ та ТН й розраховані залежності кратності можливих перенапруг від ємності ЕМ при замкненій (рис. 5) та розімкненій (рис. 6) вторинній обмотці ТН для різних фаз виникнення ОЗЗ. На підставі досліджень було зроблено висновок, що замкнена вторинна обмотка обтяжує процес відключення нелінійної індуктивності ТН.

Математична модель ЕМ для аналізу електромагнітних перехідних процесів, сформована на

базі методу контурних струмів і потокозчеплень, має такий вигляд:

$$; \quad (5)$$

$$; \quad (6)$$

9

R=∞ Ом, C=0,001 мкФ

R=0 Ом, C=0,001 мкФ

R=∞ Ом, C=1 мкФ

R=0 Ом, C=1 мкФ

Рис. 4. Осцилограми зміни кратності перенапруг, які виникають на первинній обмотці ТН

Рис. 5. Залежність кратності (k) перенапруг від ємності електричної мережі та фази виникнення ОЗЗ при замкнутій вторинній обмотці ТН

Рис. 6. Залежність кратності (k) перенапруг від ємності електричної мережі та фази виникнення ОЗЗ при розімкнутій вторинній обмотці ТН

$$, \quad (7)$$

де \mathbf{B} і \mathbf{B}_t – пряма й транспонована матриці основних контурів, взаємозалежних електричних і магнітних кіл; \vec{i} , \vec{e} , \vec{u}_c – відповідно, вектори струмів, ЕРС і напруг на ємностях електричних кіл; $\vec{\psi}$ – вектор потокозчеплення магнітних гілок схеми; $\vec{r} = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_n)$ – діагональна матриця активних опорів гілок схеми електрич-

10

них кіл; $\vec{C} = \text{diag}(C_1, C_2, \dots, C_n)$ – діагональна матриця ємностей схеми; \vec{L} – матриця власних і взаємних індуктивностей; \vec{K}_T – матриця коефіцієнтів зв'язку між витками електричних і магнітних кіл; $\vec{R}'_M = \text{diag}(R'_{M1}, R'_{M2}, \dots, R'_{Mn})$ – діагональна матриця зведених до одного витка диференційних магнітних опорів.

Для інтегрування диференційних рівнянь здійснено перетворення у вигляді

$$, \quad (8)$$

де $(d\vec{y}/dx)_{k+1}$ - похідна інтегральної вектор-функції в (k+1) точці; \vec{y}_{k+1-S} – значення інтегральної вектор-функції на даному й попередньому кроках інтегрування; a_s – постійний коефіцієнт; h - крок інтегрування; p - порядок розкладу функції.

Осцилограми (рис. 7) підтверджують можливість виникнення ФРП.

Показано, що для усунення можливих пош-

а) Рис. 7. Осцилограми процесів в ЕМ 6(10)- коджень ТН типів НТМИ та ЗНОМ можливі

- 35 кВ з ізольованою нейтраллю під час виникнення в них
- б) ФРП у випадку використання заходів щодо зриву ФРП по
- в) стороні 10 кВ:
- а) фазні напруги ЕМ 35 кВ;
- б) напруга в розімкнутому трикутнику
- г) ТН 35 кВ;
- в) фазні напруги ЕМ 10 кВ;
- г) напруга в розімкнутому трикутнику ТН 10 кВ після збурення ФРП та зриву його пристроєм захисту

різні комбінації їх захистів: шляхом встановлення пристроїв зриву ФРП або використанням нерезонуючих ТН. Визначено межі областей згасаючого й незгасаючого ФРП (рис. 8), що виникають в ЕМ напругою 6-35 кВ з ізольованою нейтраллю.


Це дає змогу:


- здійснити підбір ТН для встановлення в ЕМ;
- визначити необхідність встановлення та величину активного опору в обмотці «розімкнутий трикутник» і перевірити достатність такого захисту;
- у випадку неможливості захисту ТН шляхом встановлення активного опору в обмотці «розімкнутий трикутник» визначити можливість використання пристрою для короткочасного підключення низькоомного опору до вторинних обмоток ТН;
- при неможливості використання вищезгаданих способів для забезпечення гарантованого захисту ТН розгляну-

ти питання про зміну конфігурації ЕМ або встановлення на відповідних секціях шин трансформаторів типу НТН.

У **четвертому** розділі наведені результати досліджень причин відмов ТН і рекомендації щодо підвищення надійності їх експлуатації.

11

 - діапазон незгасаючого ФРП за резистивного навантаження в обмотці «розімкнений трикутник» ТН

 - діапазон незгасаючого ФРП за відсутності навантаження в обмотці «розімкнений трикутник» ТН і згасаючого при його наявності


 - діапазон згасаючого ФРП за резистивного навантаження в обмотці «розімкнений трикутник» ТН

Рис.8. Межі областей згасаючого і незгасаючого ФРП за різних значень струмів нульової послідовності ТН

У табл.1 наведена інформація про щорічну кількість пошкоджених ТН 6(10) і 35 кВ в ЕМ АК «Харківобленерго» за період з 1995 р. по 2007 р.

Таблиця 1-

Загальна кількість пошкоджених в АК «Харківобленерго» ТН 6(10)-35 кВ

Рік	Кількість пошкоджених ТН 6-10 кВ	Кількість пошкоджених ТН 35 кВ	Рік	Кількість пошкоджених ТН 6-10 кВ	Кількість пошкоджених ТН 35 кВ
1995	18	4	2002	49	3
1996	19	5	2003	49	5
1997	16	4	2004	28	6
1998	17	5	2005	23	4
1999	28	6	2006	19	3
2000	37	7	2007	18	3
2001	69	6			

За результатами аналізу статистичних даних:

- показано, що збільшення навантаження вторинних обмоток ТН сприяє зниженню ймовірності виникнення ФРП;
- підтверджено висновки щодо зміни магнітних характеристик ТН від кількості ремонтів і терміну експлуатації;
- підтверджено висновки про залежність характеру протікання перехідних процесів від схеми основних з'єднань ПС, де встановлено ТН;
- обґрунтовано, що наявність на ПС чергового персоналу є чинником, який впливає на зниження пошкоджуваності ТН, однак забезпечення ПС черговим персоналом мусить вирішуватись у кожному випадку окремо.

Оцінка ролі кожного з чинників, що впливають на пошкоджуваність ТН, зроблена за величинами відхилень параметра потоку відмов ω_i , величина якого визначалася за формулою:

12

$$\omega_i = \frac{m_i}{n_i \cdot T}, \quad (9)$$

де n_i – кількість ТН у групі, що входить у зазначений інтервал зміни величини фактора, що впливає на пошкоджуваність; T - період спостереження; m_i – кількість пошкоджень ТН у групі з n_i за проміжок часу T .

Методом дисперсійного аналізу визначені чинники, що найбільшою мірою впливають на пошкоджуваність ТН. Показано, що зазначені фактори визначають вплив на величину будь-якого зі співмножників формули для умови резонансу:

$$\omega_0 \cdot L_{ТН} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C_c}, \quad (10)$$

де $L_{ТН}$ – лінеаризована індуктивність ТН; C_c – сумарна зарядна ємність ПЛ-6(10) кВ або 35 кВ, підключених до секцій шин ПС; ω_0 - резонансна частота.

Експериментальним шляхом (лабораторний і натурний експеримент, досвід практичної експлуатації) обґрунтовано, що використання захистів ТН практично не впливає на початкову фазу перехідних процесів, що виникають в ЕМ з ізольованою нейтраллю. Визначені можливі надструми й перенапруги на елементах ЕМ для різних параметрів і типів ТН, що використані в експерименті .

Визначено параметри ЕМ і типи ТН, а також види ОЗЗ, за яких має місце найважчий характер протікання перехідних процесів. За результатами співставлення характеру протікання перехідних процесів під час лабораторного експерименту за умов використання ТН типів НТМИ (рис.9) і НТН (рис. 10) обґрунтована перевага останнього.

Рис.9. Осцилограма перехідного процесу струму і напруги фази «С» ТН типу НТМИ при ОЗЗ фази «А»

Рис.10. Осцилограма перехідного процесу струму і напруги фази «С» ТН типу НТН при ОЗЗ фази «А»

В умовах натурного експерименту шляхом зміни конфігурації підключених ПЛ викликано згасаючий ФРП (рис. 11). Отримані експериментальним шляхом осцилограми практично співпали з розрахунковими для зазначеної конфігурації ЕМ (рис. 12).

Під час проведення натурних експериментів визначена конфігурація ЕМ, за якої можливе виникнення незгасаючого ФРП (рис. 13). Отримані комп'ютерні осцилограми незгасаючого ФРП для зазначеної конфігурації ЕМ (рис. 14) свідчать про

Рис. 11. Реконограма напруг на вторинних обмотках ТН і струму через нейтраль згасаючого ФРП

Рис. 12. Розрахункова осцилограма ФРП для ЕМ, параметри якої відповідають натурному експерименту (рис. 11)

Рис. 13. Рекогнограма напруг на вторинних обмотках ТН і струму через нейтраль при ОЗЗ фази «А» ЕМ 10 кВ конфігурації, за якої виник незгасаючий ФРП

Рис. 14. Розрахункова осцилограма незгасаючого ФРП для ЕМ, параметри якої відповідають натурному експерименту (рис. 13)

те, що:

- найбільш важкий характер протікання перехідних процесів має місце при тій самій конфігурації ЕМ, на яку приходиться максимум пошкоджуваності ТН;
- перехідні процеси в ТН типу НТН практично не виникають під час ОЗЗ в ЕМ з ізольованою нейтраллю.

Одночасно з цим здійснено спектральний аналіз фазних напруг і струму через нейтраль ТН під час виникнення ФРП для випадків різних конфігурацій електромереж різних класів напруг (рис. 15, 16), з яких виходить, що при незгасаючому ФРП у спектральному складі струму через нейтраль ТН превалюють гармоніки низьких частот, а при згасаючому - високих.

Експериментально обґрунтовано, що найбільш надійним напрямком боротьби з пошкодженнями ТН в ЕМ є використання ТН типу НТН.

14

Рис.15. Результати спектрального аналізу струму через нейтраль ТН під час натурного експерименту (рис. 13)

Рис.16. Результати спектрального аналізу струму через нейтраль ТН під час натурного експерименту (рис. 11)

На підставі розроблених рекомендацій було змінено конфігурацію електромереж 6-10 кВ тих ПС АК «Харківобленерго», де не було можливості уникнути незгасаючого ФРП іншими заходами. Зниження пошкоджуваності ТН при цьому стало підтвердженням вірогідності теоретичних висновків. Рекомендації щодо зменшення пошкоджуваності ТН застосовані також в ЕМ ВАТ «Полтаваобленерго» та ВАТ «Львівобленерго», де було досягнуто позитивного результату, що підтверджено актами впровадження.

Рекомендації з апроксимації нелінійних характеристик гіперболічним синусом для аналізу перехідних процесів запропоновані для використання розроблювачам відповідної програми в НУ «Львівська політехніка».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-практична задача підвищення надійності роботи трансформаторів напруги у складі розподільчих електричних мереж 6(10)-35 кВ за рахунок виявлення причин виникнення ферорезонансних процесів у трансформаторах напруги, їх попередження й усунення, чим забезпечується поліпшення експлуатаційних показників розподільчих електричних мереж.

Основні наукові та практичні результати дисертації полягають у наступному:

1. Узагальнено умови й причини виникнення резонансних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю, причини пошкоджуваності трансформаторів напруги 6(10)-35 кВ. Показано, що існуючі заходи та засоби підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю є недостатньо ефективними, особливо з точки зору захисту їх від пошкодження ферорезонансними процесами через неврахування магнітних характеристик трансформаторів напруги.

2. На основі даних експериментальних досліджень встановлено явище зміни характеристик намагнічування трансформаторів напруги в процесі їх експлуатації та

15

в результаті проведення відновлювальних ремонтів, що викликає зниження надійності роботи електричних мереж через розширення зони незгасаючих ферорезонансних процесів. Встановлено, що нахил і точки перегину магнітних характеристик трансформаторів напруги залежать від кількості пошкоджень та терміну їх експлуатації.

3. Отримала подальший розвиток математична модель електромережі з трансформаторами напруги, яка враховує зміни магнітних характеристик ТН і дозволяє уточнити діапазони параметрів, за яких виникають ферорезонансні процеси, й завдяки цьому запропонувати умови надійної роботи трансформаторів напруги в електричних мережах. Врахування змін магнітних характеристик трансформаторів напруги дало змогу уточнити межі областей згасаючого й незгасаючого ферорезонансних процесів.

4. Достовірність теоретичних результатів було підтверджено експериментально на фізичній та натурній моделях діючих електричних мереж дослідженнями перехідних процесів під час заземлення однієї з фаз. Співпадання результатів натурних і лабораторних досліджень для різних конструкцій ТН з результатами математичного моделювання підтвердило теоретичні висновки дисертаційної роботи.

5. Теоретичне значення проведених досліджень полягає в подальшому розвитку теорії еле-

ктричних мереж за рахунок уточнення процесів у них при зміні параметрів трансформаторів напруги та самих електромереж.

6. Отримані результати мають таке практичне значення:

- розроблено та впроваджено рекомендації щодо вибору трансформаторів напруги для електричних мереж з ізольованою нейтраллю;
- запропоновано заходи і засоби недопущення пошкоджень трансформаторів напруги під час ферорезонансних процесів;
- запропоновані рекомендації, заходи і засоби сприятимуть підвищенню надійності роботи

електричних мереж 6(10)-35 кВ в цілому.

8. Використання отриманих результатів при практичній експлуатації розподільчих електричних мереж з номінальною напругою 6(10)-35 кВ дозволило знизити кількість пошкоджень ТН в АК «Харківобленерго» за останні п'ять років майже в 2,5 рази та підвищити на 15% надійність роботи електричних мереж, що підтверджено відповідними статистичними даними.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Говоров Ф.П., Ганус А.И., Старков К.А. Надёжность трансформаторов напряжения 6-10 кВ и эффективность мероприятий по её обеспечению // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАН України. – 2004. – Ч. 3, Тем. вип. – С. 45-48.

Здобувачеві належить оцінка ролі кожного з факторів, що впливають на пошкоджувальність трансформаторів напруги.

2. Ганус О.І., Старков К.О. Технологічні порушення як непрямий критерій надійності обладнання електричних мереж АК “Харківобленерго” // Новини енергетики. – Київ, 2004. - № 9. – С. 18-21.

Здобувачеві належить оцінка критеріїв надійності трансформаторів напруги.

16

3. Говоров Ф.П., Ганус А.И., Старков К.А. Исследование нестационарных процессов в распределительных электрических сетях 6(10)-35 кВ с целью выявления причин повреждения трансформаторов напряжения 6(10)-35 кВ // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАН України. – 2005. – Ч. 4, Тем. вип. – С. 104-109.

Здобувачеві належить формування розрахункової схеми багаторівневої електричної мережі та її елементів для математичної моделі.

4. Говоров Ф.П., Ганус А.И., Старков К.А. Влияние дрейфа магнитных характеристик трансформаторов напряжения 6(10) кВ на характер протекания феррорезонансных процессов //

Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАН України. - 2006. – Ч. 5, Тем. вип. – С. 94-99.

Здобувачем виявлено визначені причини дрейфу магнітних характеристик трансформаторів напруги.

5. Ганус А.И., Старков К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ на характер повреждений трансформаторов напряжения // Энергетика та електрифікація. – Київ, 2006. - № 2. – С. 5-12.

Здобувачеві належить розрахунок граничних параметрів електричних мереж областей згасаючого й незгасаючого ферорезонансних процесів.

6. Ганус А.И. Экспериментальное определение границ областей возможных затухающего и незатухающего феррорезонансных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью с трансформаторами напряжения // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХНАМГ. - 2006. - № 7-8. – С. 75-85.

7. Говоров П.П., Ганус О.І., Перепечений В.О. Оптимізація схем та параметрів систем електропостачання міст // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАН України. – 2007. – Ч. 4, Тем. вип. – С. 93-100.

Здобувачеві належить виконання оптимізації схеми системи електропостачання розподільчої електричної мережі.

8. Говоров Ф.П., Засидкович Н.Р., Ганус А.И., Старков К.А. Исследование феррорезонансных процессов в электрических сетях 6 – 35 кВ с трансформаторами напряжения // Новини енергетики. – Київ, 2007. - № 10. – С. 14-21.

Здобувачеві належить обґрунтування незалежності процесів протікання ферорезонансних процесів у взаємозв'язаних електромережах.

9. Ганус А.И., Говоров Ф.П., Старков К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ на характер повреждений трансформаторов напряжения // Электрика. – Москва, 2006. - № 5. – С. 28-31.

Здобувачем виконано обробку й порівняння результатів лабораторних досліджень перехідних процесів на моделі електричної мережі з підключеними реальними трансформаторами напруги.

10. Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХНАМГ. - 2003. - № 1. – С. 75-81.

Здобувачеві належить порівняльний аналіз результатів експлуатації трансформаторів напруги типів НТМИ, НАМИ та НТН.

11. Ганус А.И., Старков К.А. Факторы, влияющие на надёжность трансформаторов напряжения // Физические и технические проблемы светотехники и электроэнергетики: Международная научно-техническая конференция. Харьков, ХГАГХ, 22-23 мая 2003 г. – С. 24.

Здобувачеві належить визначення переліку факторів, що впливають на пошкоджуваність трансформаторів напруги.

12. Ганус А.И., Старков К.А. Результаты экспериментальных исследований переходных процессов в трансформаторах напряжения типов НТМИ и НТН // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХНАМГ. - 2004. - № 3. – С.81-95.

Здобувачеві належить розробка програми проведення натурних експериментів.

13. Ганус А.И., Говоров Ф.П., Старков К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ на характер повреждений трансформаторов напряжения. – В кн.: Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий – Мариуполь: ПДТУ. – 2005. – С. 190-194.

Здобувачеві належить визначення закономірностей, пов'язаних з характером протікання перехідних процесів на пошкоджуваність трансформаторів напруги.

14. Ганус А.И., Старков К.А. Исследование причин, вызывающих повреждение трансформаторов напряжения // Физические и технические проблемы светотехники и электроэнергетики. II Международная научно-техническая конференция. Харьков, ХНАГХ, 16-18 мая 2005 г. – С. 60-61.

Здобувачем зроблена оцінка ролі кожного з факторів, що впливають на пошкоджуваність трансформаторів напруги.

15. Ганус А.И. Анализ причин повреждаемости трансформаторов напряжения 6-10 кВ в электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и рекомендации по их снижению // Электрические сети и системы. – Киев, 2006. - № 5. – С. 2-6.

АНОТАЦІЇ

Ганус О.І. Підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в електричних мережах з ізольованою нейтраллю - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 - електричні станції, мережі і системи. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків - 2007.

У дисертації проаналізовано існуючі заходи щодо недопущення й зриву ферорезонансних процесів в електричних мережах 6(10)-35 кВ і захисту трансформаторів напруги.

Дано обґрунтування методики досліджень, розрахункової схеми ЕМ та її математичної мо-

делі, отримано магнітні характеристики ТН, виявлено закономірності в їх розташуванні.

Отримано математичні вирази, що визначають характер зміни процесів в ЕМ під час ФРП. Визначені параметри ЕМ, за яких найбільш ймовірні пошкодження ТН. Розроблено рекомендації щодо забезпечення умов максимального прискорення процесу згасання ФРП.

Наведено результати статистичних, лабораторних, натурних і експлуатаційних досліджень. Надані рекомендації щодо підвищення надійності експлуатації ТН. Обґрунтовано, що найбільш надійним шляхом зменшення пошкоджуваності ТН в ЕМ є використання трансформаторів типу НТН. Надані рекомендації дозволили знизити пошкоджуваність ТН в ЕМ АК «Харківобленерго» та підвищити надійність електричної мережі в цілому.

Ключові слова: трансформатор напруги, ферорезонансні процеси, апроксимація нелінійних характеристик, комутаційні перенапруги, параметр потоку відмов, замикання на землю.

Ганус А.И. Повышение надёжности работы трансформаторов напряжения в электрических сетях с изолированной нейтралью. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Харьков - 2007.

В диссертации исследованы феррорезонансные процессы (ФРП) в электрических сетях 6(10)-35 кВ и причины повреждаемости трансформаторов напряжения (ТН), разработаны мероприятия по снижению их повреждаемости.

Выполнен анализ причин возникновения резонансных процессов, дано описание наиболее характерных их видов, рассмотрены преимущества и недостатки существующих мероприятий по недопущению и срыву ФРП и защите ТН. Показана недостаточная их эффективность.

Дано обоснование методики исследований, расчётной схемы распределительной электрической сети (ЭС) разных напряжений и структуры её математической модели.

Исследованы магнитные характеристики ТН после восстановительных ремонтов. Выявлено наличие дрейфа их магнитных характеристик, зависящего от срока эксплуатации трансформаторов. Рассмотрены возможности аппроксимации магнитных характеристик полиномами третьей, пятой, седьмой степени и гиперболическим синусом. Обоснованы преимущества их аппроксимации гиперболическим синусом.

Проведены исследования на математической модели ЭС с разными классами напряжений. Получены математические выражения, определяющие характер изменения процессов в основных элементах сети при возникновении ФРП в результате появления и обрыва цепи замыкания на зем-

лю в ЭС с изолированной нейтралью. По полученным выражениям определены условия, при которых перенапряжения максимальны. Показано, что разработанные математические модели позволяют эффективно проводить расчеты переходных процессов (в том числе и ФРП) в электросетях различных напряжений с разными типами ТН. Определены границы областей изменения параметров ЭС, при которых наиболее вероятны повреждения ТН. Обоснована независимость ФРП, возникающих в ЭС с трансформаторными связями различных уровней номинальных напряжений. Установлено, что условия возникновения и характер протекания ФРП в ЭС с изолированной нейтралью зависят не только от параметров ЭС, в которой возник ФРП, но и от параметров, типа и нагрузки вторич-

ных обмоток ТН. Разработаны рекомендации по обеспечению условий максимально ускоренного процесса затухания ФРП.

Проведены статистические, лабораторные, натурные и эксплуатационные исследования причин повреждаемости ТН и разработаны рекомендации по повышению их надёжности. Показана недостаточная эффективность известных способов защиты ТН. По результатам статистического анализа повреждаемости ТН подтверждено, что чаще всего повреждаются ТН типа НТМИ и ЗНОМ. Достоверность теоретических исследований обоснована результатами лабораторных и натурных экспериментов. Статистическими исследованиями повреждаемости ТН уточнены области изменения параметров ЭС, в которых повреждаемость ТН каждого из типов максимальна; показано, что увеличение нагрузки вторичных обмоток ТН способствует снижению повреждаемости; определены зависимости повреждаемости ТН от срока их эксплуатации, наличия дежурного персонала на подстанциях и др. факторов.

Обосновано влияние изменения магнитных свойств ТН после повреждений на надёжность их эксплуатации. Методом дисперсионного анализа определены факторы в наибольшей степени влияющие на повреждаемость ТН.

Проведены лабораторные исследования характера протекания переходных процессов в ТН различного типа при однофазных замыканиях в ЭС с изолированной нейтралью. Экспериментально определены возможные перенапряжения и величины токов у различных типов ТН при различных видах замыканий на землю, получены осциллограммы наиболее характерных режимов.

В условиях натурального эксперимента путем изменения конфигурации подключенных воздушных линий 10-35 кВ был вызван затухающий ФРП. Полученные экспериментальным путем осциллограммы совпали с расчетными для указанных конфигураций ЭС. В ходе натуральных экспери-

ментов определена конфигурация ЭС, при которой возможно возникновение незатухающего ФРП.

Осуществлен спектральный анализ фазных напряжений и тока через нейтраль ТН во время возникновения ФРП для случаев разных конфигураций ЭС различных номинальных напряжений. Выявлено, что при незатухающем ФРП в спектральном составе тока через нейтраль ТН преобладают гармоники низких частот, а при затухающем - высоких.

Теоретически и экспериментально обосновано, что самым действенным способом повышения надёжности работы ТН в ЭС 6(10)-35 кВ является использование трансформаторов типа НТН.

На основании разработанных рекомендаций была изменена конфигурация ЭС 6-10 кВ от тех подстанций АК «Харьковоблэнерго», на которых чаще всего повреждались ТН. Рекомендации по снижению повреждаемости ТН были использованы также в ЭС ОАО «Полтаваоблэнерго» и ОАО «Львовоблэнерго», где также был достигнут положительный результат, подтвержденный актами внедрения. Рекомендации по аппроксимации нелинейных характеристик гиперболическим синусом для анализа переходных процессов предложены для использования разработчикам соответствующей программы в НУ «Львовская политехника».

Внедрение разработанных рекомендаций в практике эксплуатации ЭС 6(10)-35 кВ обеспечило снижение повреждаемости ТН, что подтвердило достоверность проведённых теоретических и экспериментальных исследований, приведённых в данной работе.

Ключевые слова: трансформатор напряжения, феррорезонансные процессы, аппроксимация нелинейных характеристик, коммутационные перенапряжения, параметр потока отказов, замыкание на землю.

O.S.Ganus. Operational reliability improvement of voltage transformers in the electrical networks with the insulated neutral — Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Engineering Science in specialty 05.14.02 — Electrical power stations, networks and systems. — National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute". Kharkiv — 2007.

In this dissertation the available measures for prevention and failure of ferroresonance processes (FRP) in the 6(10)-35 kV electrical networks (EN) and for protection of the voltage transformers (VT) are analyzed.

The validation of research methods, calculation model of EN and its mathematical model is given; magnetic characteristics of VT are received as well as rules in their location is defined.

The mathematical expressions are received that determine the behavior of processes in the EN during the FRP. The EN parameters are determined, by which the most possible damages of VT are available. The recommendations concerning the conditions of maximal accelerated processes of FRP attenuation are developed.

The results of statistical, laboratory, pilot and operational researches are given. The recommendations with respect to operational reliability improvement of VT are given. It was proved that the most reliable way of damageability decrease of VT in the EN is the use of the transformers Type HTH. The given recommendations enabled to decrease the damageability of VT in the electrical networks of JSC "Kharkivoblenergo".

Keywords: voltage transformer, ferroresonance processes, approximation of non-linear characteristics, switching overvoltages, failure rate, ground fault.

