

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Лебедка Сергій Миколайович

УДК 621.311.014

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ І ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ
РЕЗОНАНСНОГО ТА РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ
НЕЙТРАЛІ КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖ 6-10 кВ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Вепрік Юрій Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри передачі електричної енергії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій та систем

кандидат технічних наук, доцент
Баженів Володимир Андрійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
доцент кафедри електричних мереж та систем

Захист відбудеться «___» _____ 2013 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, ауд. _____, електрокорпус.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “_____” _____ 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С.Ю. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Досвід експлуатації електричних мереж 6–10 кВ свідчить про те, що їм властива висока ймовірність виникнення однофазних замикань на землю (ОЗЗ), які в більшості випадків переходять в міжфазні, що потім приводять до групових пошкоджень устаткування або пробоїв ізоляції в багатьох місцях. Основними факторами, що визначають показники надійності мереж 6–10 кВ, є спосіб заземлення нейтралі й засоби обмеження струмів та напруг. В цих мережах принципово можливі різні режими роботи нейтралі, кожен з яких має свої переваги й недоліки.

Вирішення проблеми вибору режиму нейтралі, параметрів резонансних або резистивних елементів в нейтралі для компенсації ємнісних струмів і обмеження перенапруг під час ОЗЗ може бути знайдене лише за умови комплексного, системного підходу до досліджень властивостей і характеристик мереж.

Дослідження електромагнітних перехідних процесів, що протікають при замиканнях на землю в мережах з різними режимами нейтралі можливі були б на основі або широкомасштабних експериментальних досліджень, або тривалої перевірки в умовах експлуатації. Але можливості проведення експериментів на діючому устаткуванні обмежені, а часто – практично виключені, а для прийняття рішень за результатами досвіду експлуатації потрібен тривалий час.

При сучасному рівні розвитку апаратних і програмних засобів обчислювальної техніки широкомасштабні дослідження можуть бути реалізовані із застосуванням методів комп'ютерного моделювання. Для проведення таких досліджень необхідні математичні моделі, що враховують всі основні характеристики мереж – їх реальні схеми, режими нейтралі, конфігурацію й склад устаткування, ємнісні й індуктивні параметри елементів мережі, нелінійні характеристики захисних апаратів. Але наявні моделі орієнтовані на врахування обмеженого числа факторів і не можуть забезпечити розв'язання таких задач.

Таким чином, розробка узагальненої математичної моделі перехідних процесів в мережах напругою 6–10 кВ для вибору параметрів резонансного і резистивного заземлення, які забезпечують обмеження ємнісних струмів та перенапруг при ОЗЗ, зниження аварійності мереж та продовження терміну їх експлуатації, є актуальною задачею та складає напрямок дослідження дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» у рамках науково-дослідних господарчих робіт: “Дослідження електромагнітних перехідних процесів і оцінка можливості зниження перенапруг при однофазних замиканнях на землю в мережах 6–10 кВ м. Суми” (№ ДР 0104U004175, ВАТ “Сумиобленерго”, м. Суми) і “Дослідження тривалих електромеханічних і електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах 10 кВ із вузлами статичного й двигунового навантаження” (№ ДР 0106U012545, АК “Харківобленерго”, м. Харків) та держбюджетних НДР МОН України: “Моделювання однофазних замикань на землю в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю з метою підвищення надійності роботи систем електропостачання” (№ ДР

0107U012783) і “Моделювання елементів системи електропостачання” (№ ДР 0110U000673), де здобувач був виконавцем окремих завдань.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є визначення умов застосування і параметрів резонансного і резистивного заземлення нейтралі, які забезпечують підвищення ефективності обмеження ємнісних струмів та перенапруг під час ОЗЗ в електричних мережах 6–10 кВ на основі комп’ютерного моделювання.

Для досягнення мети дисертаційної роботи поставлені наступні задачі:

– узагальнити математичні моделі процесів в елементах електричної мережі у фазних складових з урахуванням особливостей їх конструктивного виконання;

– розробити математичну модель електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних мережах 6–10 кВ довільної конфігурації із різними режимами нейтралі, виконати її програмну реалізацію та забезпечити автоматизацію всіх етапів моделювання на основі сучасних комп’ютерних технологій;

– провести чисельні експерименти для дослідження впливу параметрів резонансного та резистивного заземлення нейтралі на ємнісні струми й перенапруги;

– визначити області та умови застосування резонансного та резистивного заземлення нейтралі, при яких їх використання дає позитивний ефект і сформулювати вимоги до технічних засобів їх реалізації;

– розробити рекомендації щодо застосування резонансного і резистивного заземлення нейтралі та вдосконалення методик вибору їх параметрів.

Об’єкт дослідження – електромагнітні перехідні процеси при замиканнях на землю в мережах 6–10 кВ із різними режимами нейтралі.

Предмет дослідження – засоби обмеження ємнісних струмів та перенапруг при ОЗЗ у мережах 6–10 кВ з різними режимами нейтралі.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використані положення теорії електромагнітного поля, теорії електричних кіл. Для розробки моделей елементів мережі застосовано метод Гіра чисельного розв’язання систем звичайних диференціальних рівнянь. Модель електромагнітних перехідних процесів в електричній мережі отримана за допомогою методу фазних координат. Для оцінки та вибору параметрів заземлення нейтралі застосовано математичне моделювання електромагнітних перехідних процесів.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше на рівні трифазних багатополюсників при комп’ютерному моделюванні процесів в лініях електропередачі, силових трифазних трансформаторах, вузлах навантаження, засобах обмеження перенапруг застосований неявний метод Гіра другого порядку, що дозволило суттєво скоротити розмірність розв’язуваних систем диференціальних рівнянь;

– отримали подальший розвиток математичні моделі електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах 6–10 кВ на основі рівнянь у фазних координатах, формалізованих процедур складання і розв’язання диференціальних рівнянь для трифазних схем, що забезпечує можливість досліджень в

електричних мережах довільної конфігурації з різними режимами нейтралі на єдиній алгоритмічній основі;

– удосконалено методики чисельного та експериментального визначення параметрів резонансних та резистивних елементів заземлення нейтралі, що забезпечує обмеження ємнісних струмів і перенапруг та підвищення надійності релейного захисту в мережах 6-10 кВ під час замикань фази на землю.

Практична цінність одержаних результатів роботи для електроенергетичної галузі полягає в наступному:

– розроблені програмні засоби, що дозволяють проводити аналіз електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах 6-10 кВ при замиканнях фази на землю з урахуванням параметрів і конструктивних особливостей елементів, конфігурації мережі, режиму нейтралі, застосування яких дозволяє приймати обґрунтовані рішення при виборі засобів обмеження ємнісних струмів і перенапруг при ОЗЗ;

– визначено чинники, що знижують ефективність практичної реалізації резонансного заземлення нейтралі, а саме: збільшення чутливості струмів ОЗЗ до змін індуктивності ДГР зі збільшенням сумарної довжини кабельних мереж, недостатня швидкість дії регуляторів налаштування резонансу ДГР;

– встановлено причини відмов релейного захисту в мережах з резистивним заземленням нейтралі, показано, що селективне відключення пошкоджених елементів може бути забезпечено релейним захистом, що реагує на появу активної складової в струмі ОЗЗ, запропоновані кількісні оцінки для визначення області низькоомного і високоомного резистивного заземлення нейтралі, запропоновані уточнені методики вибору параметрів резистора в нейтралі.

Результати дисертаційної роботи використовуються технічними службами ВАТ “Сумиобленерго” (м. Суми) і АК “Харківобленерго” (м. Харків) для аналізу перехідних процесів при замиканнях на землю в мережах 6–10 кВ і вибору засобів обмеження струмів і перенапруг.

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них:

– виконано аналіз умов роботи електричних мереж напругою 6–10 кВ і засобів обмеження ємнісних струмів та перенапруг, що застосовують при ОЗЗ;

– розроблені математичні моделі роботи елементів електричної мережі (ліній електропередачі, силових двообмоткових трансформаторів, вузлів навантаження, засобів обмеження перенапруг) з використанням неявного методу Гіра другого порядку;

– для аналізу електромагнітних перехідних процесів розроблена математична модель електричних мереж 6–10 кВ з різними режимами нейтралі за допомогою методу фазних координат;

– запропоновано уточнений алгоритм розрахунку параметрів кабельних ліній, що враховує конструктивні особливості силових кабелів напругою 6–10 кВ;

– виконані обчислювальні експерименти при однофазних замиканнях на землю в мережах 6–10 кВ з різними режимами нейтралі для дослідження електромагнітних перехідних процесів та оцінки перенапруг;

– показано можливість застосування розробленої математичної моделі електромагнітних перехідних процесів для вирішення завдання вибору засобів обмеження струмів і перенапруг при замиканнях на землю.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: 11-ій, 12-ій, 13-ій, 19-ій Міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (м. Харків, 2003–2005, 2011 р.р.); науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету СумДУ (м. Суми, 2006–2010 р.р.); 27-ій, 29-ій науково-технічних конференціях “Моделювання” (м. Київ, 2008, 2010 р.); III-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах” (м. Луцьк, 2010 р.); 9-ій, 10-ій Міжнародних науково-технічних конференціях молодих вчених і спеціалістів “Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації” (м. Кременчук, 2011, 2012 р.р.); науково-технічних конференціях “Фізика, електроніка, електротехніка” (м. Суми, 2011, 2012р.р.); 5-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Управління режимами роботи об’єктів електричних і електромеханічних систем” (м. Святогорськ, 2011 р.); I-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Оптимальне керування електроустановками” (м. Вінниця, 2011 г.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 25 наукових працях, у тому числі: 10 статей у наукових виданнях України, 15 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 195 сторінок; серед них 45 рисунків та 17 таблиць по тексту, список використаних джерел зі 153 найменувань на 17 сторінках та 4 додатки на 27 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладається актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і основні задачі досліджень, визначено об’єкт та предмет дослідження, вказано методи дослідження, викладені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про апробацію та публікації основних результатів дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано методи й засоби обмеження ємнісних струмів і перенапруг при ОЗЗ в електричних мережах 6–10 кВ та їх ефективність. Аналіз досвіду експлуатації і матеріалів автоматичної реєстрації показує, що основною причиною аварійності є ОЗЗ, а їх наслідки залежать від ємнісних струмів в місці пошкодження та перенапруг, які виникають в мережі.

Засоби обмеження ємнісних струмів та перенапруг – включення резонансних або резистивних елементів в нейтралі електричної мережі в залежності від конкретних умов реалізації дають або позитивний, або негативний ефект, а в ряді випадків погіршують ситуацію. Це свідчить про те, що питання вибору за-

собів обмеження наслідків ОЗЗ і режиму нейтралі потребують подальших досліджень.

У **другому розділі** розглянуто стан теоретичних та експериментальних досліджень кабельних мереж з різними режимами нейтралі.

Теоретичні дослідження фізичних процесів, що призводять до виникнення перенапруг під час ОЗЗ в мережах 6–10 кВ (виконані провідними вченими В. Петерсенном, Петерсом, Слепяном, Ч.М. Джуварли, Н.Н. Беляковим, Е.Ф. Цапенко та ін.), дають лише якісне пояснення картини їх розвитку й наближені кількісні оцінки тільки для мереж з ізольованою нейтраллю для порівняно простих схем, а для складних схем дають неоднакові результати.

Кожний з експериментальних методів досліджень перенапруг (проведених під керівництвом Ф.А. Ліхачова, Ф.А. Гіндулліна, Ф.Х. Халілова, М.В. Костенко, І.М. Зархі та ін.) дозволяє вирішувати лише своє коло завдань. Достовірної інформації про характер протікання процесів, про кількісні характеристики перенапруг і про ефективність засобів обмеження перенапруг у мережах з різними режимами нейтралі недостатньо. Для одержання цих даних необхідні дослідження електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ з варіаціями різних факторів, що впливають на величини струмів й перенапруг: довжина й конфігурація електричної мережі, режим нейтралі, вид і місце замикання, значення опору в місці замикання, величина опору ізоляції, вплив різних засобів обмеження перенапруг.

При сучасному рівні розвитку апаратних і програмних засобів обчислювальної техніки повномасштабні дослідження можуть бути реалізовані за допомогою методів математичного моделювання і обчислювальної математики. Розробці таких моделей на основі методу фазних координат присвячені праці вчених В.С. Перхача, М.С. Сегеди, П.Г. Стахіва, І.Ф. Сивокобиленко, І.В. Новаша, А.В. Журахівського та ін. Але розроблені моделі орієнтовані на врахування обмеженого числа факторів і для рішення широкого кола задач потребують подальшого розвитку.

Відзначено, що розробка узагальненої математичної моделі електромагнітних перехідних процесів на основі рівнянь у фазних координатах для оцінки та вибору параметрів засобів обмеження ємнісних струмів і перенапруг при ОЗЗ у мережах 6–10 кВ з різними режимами нейтралі є актуальною задачею.

У **третьому розділі** для аналізу впливу параметрів резонансного та резистивного заземлення нейтралі на ємнісні струми та перенапруги обґрунтовано вибір математичної моделі електромагнітних перехідних процесів в кабельних мережах 6–10 кВ.

Рівняння електромагнітних перехідних процесів у лініях електропередачі в фазних координатах в диференціальній формі мають вигляд:

$$[L] \frac{d}{dt} [i_L] + [R] [i_L] = [U_L], \quad [C] \frac{d}{dt} [U_C] + [G] [U_C] = [i_C], \quad (1)$$

де $[i_L]$, $[U_L]$, $[i_C]$, $[U_C]$ – вектори змінних; $[R]$, $[L]$, $[G]$, $[C]$ – матриці параметрів ліній електропередачі.

Початковими умовами є миттєві значення струмів і напруг в елементах мережі в момент виникнення ОЗЗ, вони визначаються з розрахунку нормального режиму, що передує перехідному процесу.

Для чисельного розв'язання диференціальних рівнянь перехідних процесів в електричних мережах 6–10 кВ вибрано неявний метод Гіра другого порядку (формулу Шихмана).

Для використання метода Гіра для трифазних мереж виконано наступне:

- складені рівняння перехідних процесів для трифазних багатополісників в диференціальній формі для всіх елементів мереж 6–10 кВ;
- отримані рівняння трифазних багатополісників в дискретній формі на основі методу Гіра другого порядку – дискретні моделі для елементів мереж.

Для отримання рівнянь ліній електропередачі в дискретній формі з використанням формул другого порядку неявного метода Гіра виконано узагальнення на трифазні багатополісні елементи:

$$[i_L]^{(k+1)} = \frac{4}{3}[i_L]^{(k)} - \frac{1}{3}[i_L]^{(k-1)} + \frac{2}{3}h \frac{d}{dt}[i_L]^{(k+1)}, \quad [U_C]^{(k+1)} = \frac{4}{3}[U_C]^{(k)} - \frac{1}{3}[U_C]^{(k-1)} + \frac{2}{3}h \frac{d}{dt}[U_C]^{(k+1)} \quad (2)$$

Рівняння (1) розв'язуються відносно похідних і підставляються в формули (2) і далі виражаються відносно $[i_L]^{(k+1)}$ и $[i_C]^{(k+1)}$:

$$\begin{aligned} [i_L]^{(k+1)} &= \left([R] + \frac{3}{2h}[L] \right)^{-1} [U_L]^{(k+1)} + \frac{2}{h} \left([R] + \frac{3}{2h}[L] \right)^{-1} [L][i_L]^{(k)} - \frac{1}{2h} \left([R] + \frac{3}{2h}[L] \right)^{-1} [L][i_L]^{(k-1)}; \\ [i_C]^{(k+1)} &= \left(\frac{3}{2h}[C] + [G] \right) [U_C]^{(k+1)} - \frac{2}{h}[C][U_C]^{(k)} + \frac{1}{2h}[C][U_C]^{(k-1)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Рівняння (3) характеризується як дискретна математична модель процесів у трифазній кабельній лінії.

Наведені в довідковій літературі параметри кабельних ліній в фазних координатах або різняться між собою, або взагалі відсутні. Тому в роботі запропоновано уточнений алгоритм визначення параметрів кабельних ліній 6–10 кВ в фазних координатах: активних опорів, власних і взаємних індуктивностей, часткових ємностей жил з використанням теорії електромагнітного поля та даних про конструктивне виконання кабелів.

Дискретні рівняння силового двообмоткового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток $\Delta/Y-11$, отримані з використанням формули другого порядку неявного методу Гіра, мають вигляд

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} y_{TD} & y_{TD} \\ y_{TD} & y_{TD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} a_{TD} & a_{TD} \\ a_{TD} & a_{TD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} b_{TD} & b_{TD} \\ b_{TD} & b_{TD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}^{(k-1)} \quad (4)$$

і дозволяють визначати значення струмів в обмотках трансформатора на черговому кроці чисельного інтегрування за значеннями струмів і напруг, знайденими на попередніх кроках.

Дискретні рівняння індуктивних і ємнісних елементів з глухозаземленою нейтраллю:

$$[i_L]^{(k+1)} = [Y_L][U_L]^{(k+1)} + [A_L][i_L]^{(k)} + [A'_L][i_L]^{(k-1)}, \quad (5)$$

$$[i_C]^{(k+1)} = [Y_C][U_C]^{(k+1)} + [Y'_C][U_C]^{(k)} + [Y''_C][U_C]^{(k-1)}, \quad (6)$$

частині (10) залежать від фазних струмів індуктивних і напруг ємнісних елементів на попередніх інтервалах часу й змінюються від кроку до кроку. Система алгебраїчних рівнянь (10) дозволяє визначити миттєві значення параметрів режиму фаз на поточному $(k+1)$ -му інтервалі часу перехідного процесу за відомими параметрами режиму на попередніх k -му і $(k-1)$ -му кроках.

Таким чином, на основі системи (10) можна розв'язувати наступні задачі:

- моделювати електромагнітні перехідні процеси в трифазних електричних мережах при ОЗЗ з урахуванням їх реальних схем, складу і параметрів обладнання, індуктивних та ємнісних елементів, параметрів резонансних та резистивних елементів у нейтралі;

- дослідити фактори, що впливають на ємнісні струми й перенапруги в мережах при ОЗЗ, та ступінь їх впливу;

- виконувати чисельне дослідження електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ в мережах із різними режимами нейтралі, оцінювати вплив параметрів заземлюючих елементів на обмеження ємнісних струмів і перенапруг.

Методика дослідження перехідних процесів в електричних мережах на основі запропонованої моделі реалізована у вигляді програмного комплексу. Вірогідність результатів, одержаних розробленою математичною моделлю й програмними засобами, підтверджується проведеним експериментальним і розрахунковим тестуванням на реальних об'єктах: схемах міських кабельних мереж ВАТ «Сумиобленерго» та АК «Харківобленерго», що засвідчено актами впровадження науково-дослідних господарчих робіт № ДР 0104U004175 та № ДР 0106U012545.

У **четвертому розділі** представлені результати чисельного дослідження електромагнітних перехідних процесів при замиканнях на землю в мережах 6–10 кВ з різними режимами нейтралі.

Аналіз кількісних характеристик перехідних процесів при замиканнях на землю (в т.ч. дугових) для схем мереж 6 кВ із ізольованою нейтраллю показує:

- перенапруги в мережі при виникненні замикання досягають величини $3,5 U_{\phi}$. Ступінь віддаленості, початкові фази комутацій, довжина мережі на цю величину впливають незначно;

- струми замикань на землю в сталих режимах ОЗЗ залежать від довжини мережі й досягають значень від 25 А (для мережі довжиною 21,5 км) до 125 А (для мережі довжиною 85,3 км), початкові імпульси струму змінюються від 200 А до 1100 А.

- при дугових замиканнях в залежності від віддаленості від джерела живлення імпульс струму змінюється від 1,1 кА до 3,2 кА, напруга фаз після гасіння дуги – від 12,1 кВ до 14,2 кВ (до $4,1 U_{\phi}$).

Крім того, при повторних гасіннях дуги спостерігається зміщення трикутника фазних напруг, і цей зсув зберігається тривалий час, що також є додатковим погіршуючим фактором.

Результати розрахунків свідчать, що при ОЗЗ в мережах з ізольованою нейтраллю мають місце імпульси струму в 1,5–3,2 кА тривалістю 20 мс. Це близько до межі пропускнуої здатності вентильних розрядників, тому дугогасна

здатність розрядників може виявитися недостатньою для обмеження перенапруг.

Виконано чисельне моделювання перехідних процесів при ОЗЗ у схемах із ДГР у нейтралі. Показано, що при заземленні нейтралі трансформатора через ДГР і його резонансному налаштуванні забезпечується зменшення ємнісного струму в місці пошкодження до мінімальних значень, знижуються імпульси струму при виникненні ОЗЗ та перенапруги в мережі. Але застосування ДГР ефективно лише якщо ємнісний струм ОЗЗ компенсується повністю або незначною похибкою (1–5 %).

Виконано чисельне моделювання перехідних процесів при ОЗЗ у схемах із резистором у нейтралі. Перенапруги при малих значеннях опорів у нейтралі знижуються порівняно з ізольованою нейтраллю, при збільшенні – приймають попередні значення.

Відзначена можливість уточнення діапазону значень опорів резистора, при яких мережа працює з низькоомним або високоомним заземленням нейтралі. Повний струм в пошкодженій та непошкоджених фазах відгалуження, що живить точку ОЗЗ, відрізняються тільки при малих значеннях опору резистора в нейтралі R_n . При більших опорах, починаючи з деякого граничного значення $R_{гр}$, ця різниця зникає, як в мережі з ізольованою нейтраллю. Тому основне призначення мережі з низькоомним резистором – забезпечення селективного відключення пошкодженої ділянки – може бути реалізоване лише при умові

$$R_{нейтр} < R_{гр}. \quad (11)$$

За цією умовою можна розрізнити низькоомне та високоомне заземлення.

Однак ступінь відмінності залежить від завантаження мережі, що ускладнює вибір величини опору резистора. Значення $R_{гр}$ тим менше, чим більше навантаження ділянки, а при менших значеннях опору значно збільшуються струми в місці пошкодження та в живильних кабелях.

При високоомному заземленні $R_{нейтр} > R_{гр}$, перехідні процеси при ОЗЗ протікають так само, як і в мережі з ізольованою нейтраллю: зниження ємнісного струму й гасіння дуги не забезпечується, відбувається лише обмеження перенапруг. Тому високоомні резистори слід розглядати лише як засіб покращення властивостей мереж з резонансним заземленням шляхом паралельного включення в нейтраль резистора та ДГР.

При комбінованому заземленні нейтралі (ДГР паралельно з резистором) показано, що при наявності паралельно ввімкненого резистора затухання аперіодичної складової струму ОЗЗ відбувається швидше.

Таким чином, резонансне заземлення (тільки ДГР або в поєднанні з високоомним резистором) дає позитивний ефект і завдання підвищення точності налаштування ДГР при цьому способі заземлення нейтралі залишається актуальним.

З урахуванням результатів дослідження та за вимогами до надійності способи заземлення нейтралі можна розділити на три групи:

1. Мережі з ДГР та мережі з комбінованим заземленням нейтралі.
2. Мережі з ізольованою нейтраллю (або нейтраллю з високоомним резистором).

3. Мережі з низькоомним резистором в нейтралі.

Завдання вибору способу заземлення нейтралі треба вирішувати в два етапи: на першому виконувати вибір, виходячи з вимог до надійності електропостачання, а на другому прийняте рішення уточнювати з урахуванням вимог до системи регулювання ДГР, значень ємнісних струмів, необхідності застосування резисторів, визначення їх параметрів.

У **п'ятому розділі** виконано чисельне дослідження впливу параметрів резонансного і резистивного заземлення нейтралі на ефективність обмеження ємнісних струмів та перенапруг на основі розроблених методів розрахунку процесів у кабельних мережах 6–10 кВ.

Різні режими нейтралі, заземлення через резистори, використання ДГР і засобів настройки в резонанс, ОПН, дозволяють зменшити негативні наслідки, пов'язані з виникненням ємнісних струмів та перенапруг при ОЗЗ. В той же час практичне використання цих засобів не завжди дає бажаний ефект, тому питання підвищення ефективності їх застосування потребують досліджень.

Виконані розрахунки ОЗЗ в електричних мережах 6–10 кВ (довжиною від 20 до 90 км) і зміні параметрів ДГР і резисторів (від 0 до 1000 Ом). При цьому охоплюється весь діапазон довжин і можливих режимів нейтралі мереж: ізолювані й глухозаземлені, резонансно- й резистивно-заземлені, з низькоомним або високоомним резистором.

Результати розрахунків представлені на графіках (рис. 1–4).

В мережах з ізолюваною нейтраллю при зміні сумарної довжини мережі від 21,5 км (схема 1) до 85,3 км (схема 4) ємнісний струм в місці замикання змінюється від 15 до 96 А. При ввімкненні в нейтраль ДГР і збільшенні його опору ємнісні струми й еквівалентні провідності знижуються до нуля та при настанні резонансу змінюють знак (рис. 1,б і 2,а). Струм в нейтралі (рис. 2,б) зі збільшенням $X_{\text{нейтр}}$ знижується до нуля, напруга нейтралі (рис. 1,а) зростає до фазної, причому зміна довжини мережі на ці залежності практично не впливає.

Результати моделювання, проведеного для схем довільної конфігурації, дозволяють з'ясувати фактори, що знижують ефективність практичної реалізації резонансного налаштування ДГР.

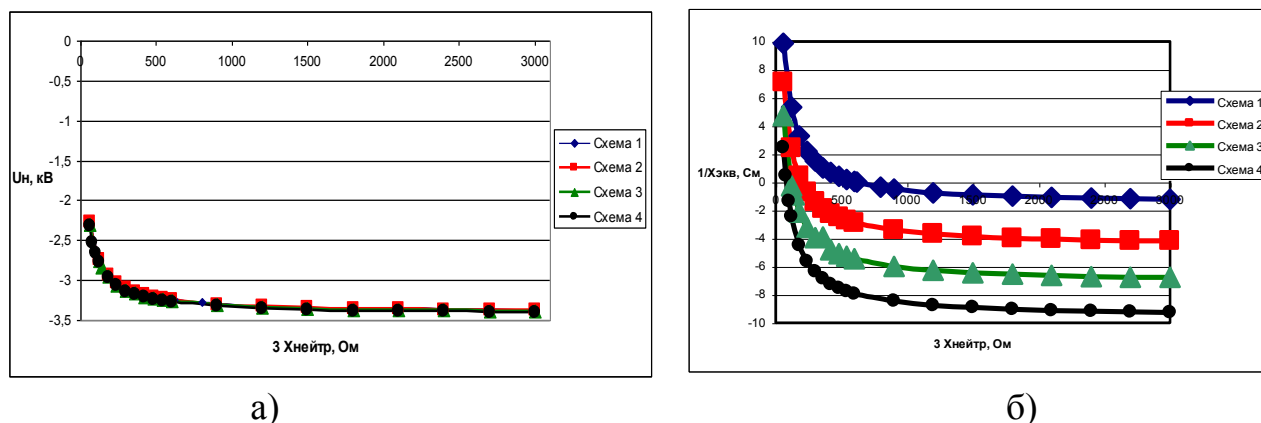


Рис. 1. Залежність напруги зміщення нейтралі (а) та реактивної провідності мережі (б) від реактивного опору в нейтралі

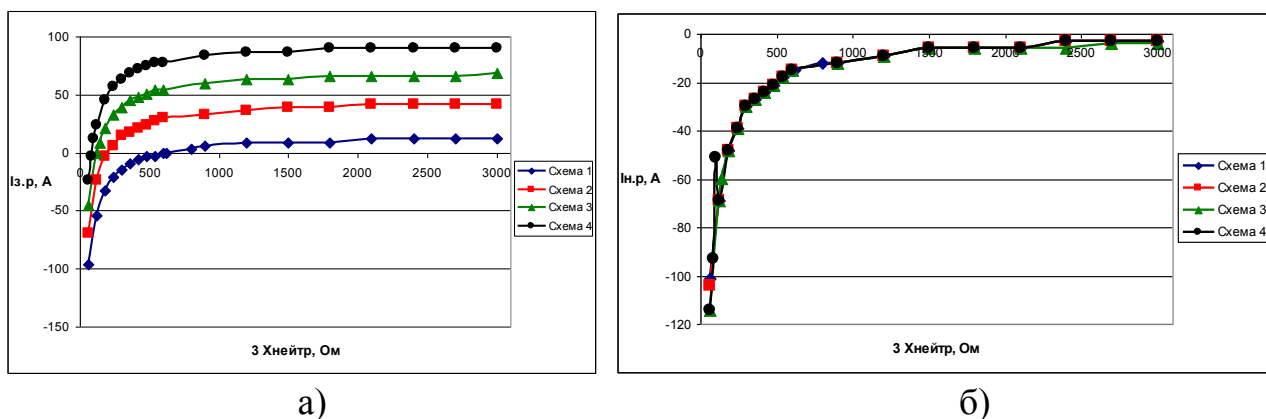


Рис. 2. Залежність реактивної складової струму в місці замикання (а) та реактивної складової струму в нейтралі (б) від реактивного опору в нейтралі

По-перше, відмінність напруги нейтралі (рис. 1,а) від фазної тим більша, чим менший опір нейтралі, а навколо резонансних значень $X_{\text{нейтр}}$ напруга нейтралі значно відрізняється від фазної. В той же час діючою методикою рекомендується визначати ємнісний струм мережі виходячи з того, що напруга нейтралі є рівною фазній. Налаштування ДГР в резонанс при цьому не може бути забезпечено.

По-друге, криві на рис. 1,б і 2,а біля резонансних значень $X_{\text{нейтр}}$ тим крутіші, чим довше є мережа. Це означає, що умови резонансу ДГР повинні виконуватися тим точніше, чим довша мережа.

Тому точність визначення параметрів кабельних ліній, ємнісних струмів, еквівалентних опорів мережі, пристроїв автоматичного налаштування ДГР необхідно підвищити порівняно з методами, рекомендованими діючими нормативними документами.

В мережах з резистором в нейтралі реактивні складові струмів в точці ОЗЗ збільшуються (рис. 4,а), причому в низькоомному діапазоні змінюються суттєво, при більших опорах зміни незначні. Зміни струму й напруги нейтралі (рис. 3,а і 4,б) залежать практично тільки від опору в нейтралі й не залежать від сумарної ємності мережі, причому вплив опору на струм і напругу суттєвий тільки в низькоомній частині.

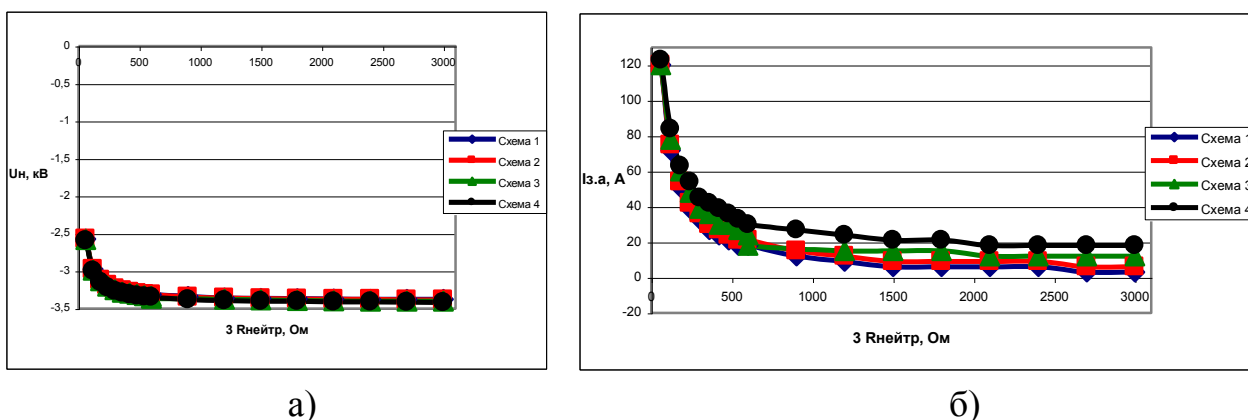


Рис. 3. Залежність напруги зміщення нейтралі (а) та активної складової струму в місці замикання (б) від активного опору в нейтралі

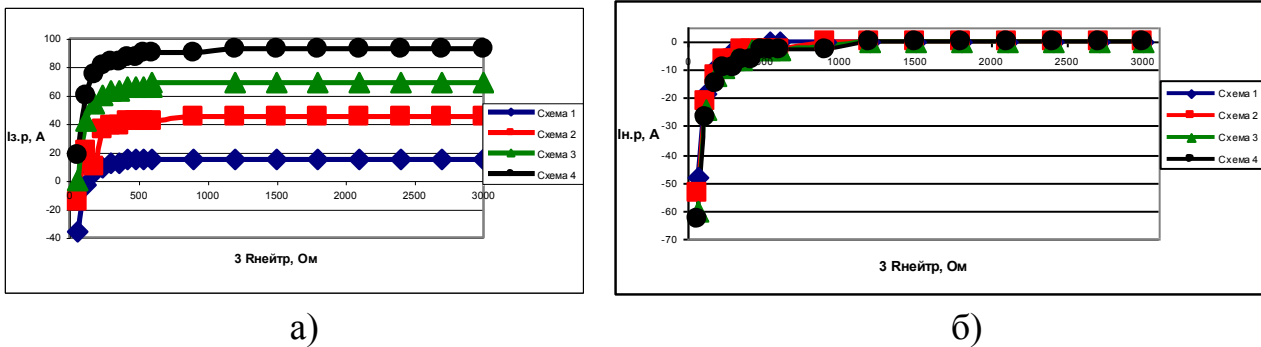


Рис. 4. Залежність реактивних складових струму в місці замикання (а) та струму в нейтралі (б) від активного опору в нейтралі

Отримані для реальної конфігурації мережі результати й залежності дозволяють підвищити точність визначення параметрів при виборі обладнання для резистивного заземлення нейтралі.

По-перше, користуючись спрощеними розрахунковими схемами, при виборі низькоомного резистора передбачається, що напруга нейтралі близька до фазної, а струм через резистор практично дорівнює струму в місці пошкодження. Залежностями, отриманими з використанням повних схем мережі (рис. 3, 4), ці припущення не підтверджуються.

По-друге, з отриманих результатів впливає, що при низькоомному резисторі ОЗЗ супроводжуються появою активної складової в струмі замикання (рис. 3,б), і цей факт можна використати для створення селективного захисту від ОЗЗ. В той же час селективність захисту, що реагує на повний струм ОЗЗ, не виконується в зв'язку з тим, що ступінь відмінності струмів пошкодженої і здорових фаз залежить від завантаження мережі, і надійне відлаштування захисту від струмів в нормальних режимах не забезпечується, що підтверджується публікаціями, в яких відображено досвід застосування резисторів.

На основі комп'ютерного моделювання визначені амплітуди й тривалість імпульсів струмів при ОЗЗ, що дає можливість більш точно вирішити завдання вибору ОПН в мережах 6–10 кВ.

Для вибору ДГР і резисторів необхідно визначати ємнісні струми мережі. Нормативними документами рекомендується визначати струми ОЗЗ за емпіричними формулами, наприклад

$$I_3 = \frac{U_{\text{л}} \cdot (35 \cdot l_{\text{кл}} + l_{\text{пл}})}{350}, \quad (12)$$

де $U_{\text{л}}$ – лінійна напруга мережі, кВ; $l_{\text{кл}}$, $l_{\text{пл}}$ – сумарна довжина електрично зв'язаних між собою кабельних і повітряних ліній, км.

Формула (12) дозволяє знайти наближене значення з точністю до 10 %, що суперечить вимогам цих же документів щодо настройки резонансу ДГР з точністю до 5 %. Розроблені в роботі алгоритми та програмні засоби дозволяють вирішити завдання визначення параметрів кабельних ліній та ємнісних струмів з необхідною точністю.

Похибка у визначенні струму ОЗЗ за наближеною методикою (а не за методом симетричних складових) обумовлена тим, що не враховується вплив схем заміщення прямої та зворотної послідовностей, а також, що параметри елементів схеми нульової послідовності відрізняються від параметрів для двох інших схем. Крім того, ввімкнення в нейтраль ДГР змінює залежності, отримані для мережі з ізольованою нейтраллю.

Для експериментального визначення значень ємнісного струму ОЗЗ використовують, як правило, метод штучного зсуву нейтралі від додаткового джерела напруги. Струм ОЗЗ знаходять за формулою

$$I_{f \text{ ОЗЗ}} = I_{\text{дв}} \frac{U_{\text{ф}}}{U_{\text{дк}}}, \quad (13)$$

де $I_{\text{вим}}$ – струм, виміряний амперметром; $U_{\text{ф}}$ – фазна напруга мережі;

$U_{\text{дк}}$ – напруга джерела, подана в нейтраль заземлюючого трансформатора.

Перерахунок виміряного струму за формулою (13) виконують в припущенні, що напруга в нейтралі трансформатора в режимі ОЗЗ дорівнює фазній. Результати моделювання для повних схем мереж (рис. 2,а, 4,а) свідчать, що напруга нейтралі в режимах ОЗЗ нижче номінальної, причому значно. При настроюванні ДГР згідно з (13) резонанс не забезпечується. Це є ще однією з причин недостатньої ефективності практичної реалізації цього способу заземлення нейтралі та свідчить про те, що тільки на шляху розробки й застосування повних моделей можливе прийняття правильних рішень, направлених на підвищення ефективності застосовуваних засобів і зниження аварійності електричних мереж.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано вирішення науково-прикладної задачі вибору режиму нейтралі кабельних мереж 6-10 кВ і оцінки параметрів обладнання, необхідного для його реалізації, що дозволяє обмежити негативні наслідки однофазних замикань на землю, знизити аварійність і збільшити терміни служби цих мереж, на основі реалізації підходів комп'ютерного моделювання.

В роботі отримано наступні результати:

1. Отримані узагальнені математичні моделі трифазних елементів мережі на основі неявного методу Гіра другого порядку, які забезпечують підвищення точності моделювання перехідних процесів і визначення параметрів ДГР і резисторів, що застосовуються для обмеження негативних наслідків ОЗЗ, та враховують особливості їх конструктивного виконання.

2. Розроблено математичну модель електричної мережі в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів при комутаціях в мережах, що дозволяє врахувати всі основні фактори, які впливають на рівні перенапруг і ємнісних струмів при ОЗЗ – реальну конфігурацію мережі, наявність ДГР, резисторів в нейтралі, схеми з'єднання обмоток трансформаторів. Виконана програмна реалізація розробленої моделі, що забезпечує можливість моделювання електромагнітних перехідних процесів при широкій варіації схем, конфігурації та протяжності електричних мереж, параметрів резистивних і ре-

зонансних елементів заземлення нейтралі, і автоматизацію всіх етапів моделювання перехідних процесів – від формування і розв’язання систем рівнянь до подання цифрограм перехідних процесів користувачеві.

3. Виконані чисельні дослідження електромагнітних перехідних процесів при ОЗЗ в електричних мережах, обладнаних різними засобами обмеження (ДГР, резистори, ОПН), визначено якісні та кількісні характеристики перехідних процесів, необхідні для аналізу умов роботи мереж з різними режимами нейтралі.

4. Виявлено фактори, що знижують точність визначення параметрів і ефективність застосування засобів обмеження ємнісних струмів та перенапруг при ОЗЗ: в мережах з резистивно-заземленими нейтраліями – відсутність методик визначення параметрів резисторів, складність забезпечення селективної роботи РЗ, що реагує на повний струм промислової частоти, в мережах з резонансно-заземленими нейтраліями – недостатня чутливість і швидкість дії регуляторів ДГР, низька точність розрахункового та експериментального визначення параметрів ДГР, значень ємнісних струмів.

5. Розроблені рекомендації для визначення умов застосування резонансного та резистивного заземлення нейтралі та удосконалення методик вибору їх параметрів. Запропоновано методики, алгоритми та програмні засоби для визначення параметрів кабельних ліній, реакторів, резисторів і ємнісних струмів, вибору і настройки засобів компенсації і релейного захисту з точністю, необхідною для забезпечення їх ефективної роботи.

6. Результати роботи та розроблений програмний комплекс впроваджено у ВАТ «Сумиобленерго» та АК «Харківобленерго».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лебедка С.Н. Дискретные модели элементов электрической сети, полученные с использованием формулы второго порядка неявного метода Гира / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2004. – № 22. – С. 21–26.

Здобувачем розроблено дискретні математичні моделі елементів електричної мережі з використанням формули другого порядку неявного методу Гира.

2. Лебедка С.Н. Математическое моделирование переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью в фазных координатах / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка, В.Ю. Веприк // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 3. – С. 74–77.

Здобувачем розроблено математичну модель перехідних процесів в електричній мережі з ізольованою нейтраллю у фазних координатах.

3. Лебедка С.Н. Модели и параметры кабельных линий в фазных координатах / С.Н. Лебедка // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2005. – № 36. – С. 25–32.

4. Лебедка С.Н. Исследование электромагнитных переходных процессов в кабельных сетях 6 кВ при однофазных замыканиях на землю / Ю.Н. Веприк,

С.Н. Лебедка, В.Ю. Веприк // Энергетика и электрификация. – 2005. – № 9. – С. 27–32.

Здобувачем проведено обчислювальні експерименти електромагнітних перехідних процесів у мережах напругою 6 кВ при ОЗЗ.

5. Лебедка С.Н. Исследование длительных электромагнитных переходных процессов в электрических сетях 10 кВ / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2007. – № 4. – С. 64–70.

Здобувачем проведено обчислювальні експерименти електромагнітних перехідних процесів у лініях напругою 10 кВ при ОЗЗ.

6. Лебедка С.Н. Перенапряжения в электрических сетях 6–35 кВ и современные средства их ограничения при замыканиях на землю / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка, М.В. Петровский // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2008. – № 4. – С. 59–69.

Здобувачем виконано аналіз умов роботи електричних мереж напругою 6–35 кВ і засобів обмеження перенапруг при ОЗЗ.

7. Лебедка С.Н. Математическое моделирование замыканий на землю в сетях 6 кВ с различными режимами нейтрали / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2011. – № 11. – С. 85–88.

Здобувачем проведено моделювання ОЗЗ в кабельних мережах напругою 6 кВ з різними режимами нейтралі.

8. Лебедка С.Н. Эффективность средств компенсации емкостных токов в электрических сетях 6–10 кВ / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2011. – № 57. – С. 57–64.

Здобувачем визначені фактори, що знижують ефективність застосування засобів компенсації ємнісних струмів при ОЗЗ в мережах 6-10 кВ.

9. Лебедка С.М. Аналіз замикань на землю в мережах 6 кВ для вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В.І. Романовський, С.М. Лебедка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 101–104.

Здобувачем проведено аналіз способів заземлення нейтралі в електричних мережах 6 кВ для зменшення негативних наслідків замикань на землю.

10. Лебедка С.Н. Математическое моделирование режимов работы электросетей с ОПН / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 3/8. – С. 25-29.

Здобувачем виконано моделювання роботи ОПН в мережах 6-10 кВ при однофазних замиканнях на землю.

11. Лебедка С.М. Отримання дискретних моделей елементів мереж з використанням неявного методу другого порядку чисельного розв’язання диференціальних рівнянь / С.М. Лебедка, Ю.М. Веприк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: Анотації доповідей міжнародної науково-практичної конференції 20-21 травня 2004 р., Харків. – 880 с.

Здобувачем розроблено дискретні математичні моделі елементів електричної мережі з використанням формули другого порядку неявного методу Гіра.

12. Лебедка С.Н. Расчет параметров математической модели кабельной линии в фазных координатах / С.Н. Лебедка // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Анотації доповідей міжнародної науково-практичної конференції 19-20 травня 2005 р., Харків. – 885 с.

13. Лебедка С.Н. Исследование переходных процессов в КЛ 6 кВ при однофазных замыканиях на землю / С.Н. Лебедка, А.Д. Коваленко // Тези доповідей науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету СумДУ. – Суми: Вид-во СумДУ. – 2006. – С. 174.

Здобувачем проведено обчислювальні експерименти електромагнітних перехідних процесів у кабельних мережах 6 кВ при ОЗЗ.

14. Лебедка С.Н. Аварийные однофазные замыкания на землю в воздушных линиях 10 кВ / С.Н. Лебедка, В.В. Воропай // Тези доповідей науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету СумДУ. – Суми: Вид-во СумДУ. – 2007. – С. 149.

Здобувачем проведено обчислювальні експерименти електромагнітних перехідних процесів у електричних мережах 10 кВ при ОЗЗ.

15. Лебедка С.Н. Моделирование электрических сетей с изолированной нейтралью с помощью фазных координат / С.Н. Лебедка // Тези доповідей XXVII науково-технічної конференції „Моделювання” 10-11 січня 2008р., Київ. – 64 с.

16. Лебедка С.М. Розробка математичної моделі трансформатора з використанням фазних координат / С.М. Лебедка, Д.В. Ярошенко // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету електроніки та інформаційних технологій СумДУ. – Суми: Вид-во СумДУ. – 2009. – С. 121.

Здобувачем розроблено дискретну математичну модель силового трансформатора з використанням формули другого порядку неявного методу Гіра.

17. Лебедка С.М. Моделювання сталих режимів електричних мереж 6 кВ при замиканнях на землю / С.М. Лебедка, Є.В. Шолудько // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету електроніки та інформаційних технологій СумДУ. – Суми: Вид-во СумДУ. – 2009. – С. 119-120.

Здобувачем проведено моделювання сталих режимів при ОЗЗ в кабельних мережах напругою 6 кВ з різними режимами нейтралі.

18. Лебедка С.М. Моделювання мереж 6 кВ при замиканнях на землю / С.М. Лебедка // Моделювання: XXIX науково-технічна конференція, Київ, 12-13 січня 2010 р.: тези доповідей. – Київ: ІПМЕ, 2010. – С. 32.

19. Лебедка С.М. Оптимізація режиму заземлення нейтралі в розподільчих мережах 6–35 кВ з метою підвищення експлуатаційної надійності мереж / В.І. Романовський, С.М. Лебедка // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: III міжнародна науково-

технічна конференція, Луцьк, 28-30 червня 2010 р.: тези доповідей. – Луцьк: ЛНТУ, 2010. – С. 159–161.

Здобувачем запропоновано моделі оцінки та вибору параметрів засобів обмеження ємнісних струмів і перенапруг.

20. Лебедка С.М. Моделювання електромагнітних перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю з використанням фазних координат / С.М Лебедка // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: IX міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 7-8 квітня 2011 р.: збірник матеріалів. – Кременчук: КНУ, 2011. – С. 320.

21. Лебедка С.Н. Анализ режимов заземления нейтрали электрических сетей 6–10 кВ / С.Н. Лебедка // Фізика, електроніка, електротехніка: науково-технічна конференція, Суми, 18-22 квітня 2011 р.: матеріали доповідей. – Суми: СумДУ, 2011. – С. 115.

22. Лебедка С.Н. Эффективность применения средств ограничения емкостных токов и перенапряжений в электрических сетях 6–10 кВ / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XIX міжнародна науково-практична конференція, Харків, 1-3 червня 2011 р.: тези доповідей. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – С. 197.

Здобувачем визначено фактори, що знижують ефективність застосування засобів компенсації ємнісних струмів при ОЗЗ в мережах 6-10 кВ.

23. Лебедка С.Н. Математическое моделирование замыканий на землю в сетях 6 кВ с различными режимами нейтрали / С.Н. Лебедка // Оптимальне керування електроустановками: I міжнародна науково-технічна конференція, Вінниця, 25-27 жовтня 2011 р.: тези доповідей. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 49.

24. Лебедка С.М. Підвищення ефективності засобів компенсації ємнісних струмів в електричних мережах 6-10 кВ / С.М Лебедка // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: X міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів, Кременчук, 28-29 березня 2012 р.: збірник матеріалів. – Кременчук: КрНУ, 2012. – С. 316-317.

25. Лебедка С.М. Фактори зниження ефективності компенсації ємнісних струмів в електричних мережах 6–10 кВ / Лебедка С.М., Веприк Ю.М. // Фізика, електроніка, електротехніка: науково-технічна конференція, Суми, 16-21 квітня 2012 р.: матеріали доповідей. – Суми: СумДУ, 2012. – С. 141.

Здобувачем визначено фактори, що знижують ефективність застосування засобів компенсації ємнісних струмів при ОЗЗ в мережах 6-10 кВ.

АНОТАЦІЇ

Лебедка С.М. Моделі та методи оцінки і вибору параметрів резонансного та резистивного заземлення нейтралі кабельних мереж 6-10 кВ. На правах рукопису.

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, 2013.

Дисертація присвячена розробці математичної моделі для дослідження електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах 6–10 кВ для уточнення параметрів засобів обмеження ємнісних струмів і перенапруг при ОЗЗ в мережах з різними способами заземлення нейтралі та вимог до них, що дозволяє підвищити ефективність їх застосування.

В роботі розроблено модель електричної мережі 6–10 кВ з використанням діакоптичного методу. На основі рівнянь у фазних координатах отримано дискретні математичні моделі трифазних елементів мереж 6–10 кВ із використанням неявного методу інтегрування.

Модель мережі 6–10 кВ та програмні засоби дозволяють аналізувати електромагнітні перехідні процеси при замиканнях на землю, визначати області застосування мереж з різними режимами нейтралі, вибрати засоби обмеження струмів і перенапруг.

Проведено обчислювальні експерименти в мережах 6–10 кВ довільної конфігурації з різним режимом нейтралі, конструктивним виконанням, довжиною, засобами обмеження струмів і перенапруг.

Запропоновано заходи підвищення ефективності методів і засобів обмеження ємнісних струмів та перенапруг в електричних мережах 6–10 кВ.

Ключові слова: електрична мережа, електромагнітні перехідні процеси, фазні координати, перенапруга, нейтраль, замикання на землю, дугогасний реактор.

Лебедка С.Н. Модели и методы оценки и выбора параметров резонансного и резистивного заземления нейтрали кабельных сетей 6-10 кВ. На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертация посвящена разработке математической модели для исследования электромагнитных переходных процессов в электрических сетях 6–10 кВ для уточнения параметров средств ограничения емкостных токов и перенапряжений при ОЗЗ в сетях с разными способами заземления нейтрали и требований к ним, что позволяет повысить эффективность их применения.

Показано, что в процессе эксплуатации на изоляцию электрических сетей 6–10 кВ воздействуют перенапряжения, кратности и длительности которых представляют значительную опасность для этих сетей. Необходимо применение средств ограничения перенапряжений и токов. Для обоснования принимаемых решений нужно иметь полные данные о характере протекания процессов и количественные характеристики перенапряжений. Для получения этих данных необходимы исследования переходных процессов при ОЗЗ с вариациями различных факторов, влияющих на величины токов и перенапряжений.

Разработана модель электрической сети 6–10 кВ для анализа электромагнитных переходных процессов; в качестве уровня декомпозиции приняты трехфазные многополюсники, соответствующие реальным элементам электри-

ческой сети. Получены дискретные математические модели трехфазных элементов электрических сетей 6–10 кВ с использованием формулы второго порядка неявного метода Гира, основанные на уравнениях в фазных координатах, которые являются более гибкими и универсальными, чем в традиционно применяющемся для расчетов аварийных режимов методе симметричных составляющих. Выполнена программная реализация разработанной модели сети.

Проведена расчетная и экспериментальная проверка достоверности результатов, получаемых разработанной математической моделью и программными средствами, на реальных объектах. Положительные результаты тестирования дают основания использовать их в вычислительных экспериментах для исследования электромагнитных переходных процессов, оценки перенапряжений и токов при замыканиях на землю в электрических сетях 6–10 кВ с различными режимами нейтрали и выбора средств ограничения перенапряжений.

Проведены вычислительные эксперименты в кабельных и воздушных сетях 6–10 кВ произвольной конфигурации, различающихся режимом нейтрали, конструктивным исполнением, протяженностью, средствами ограничения токов и перенапряжений при замыканиях фазы на землю для исследования электромагнитных переходных процессов, в результате которых получены количественные характеристики перенапряжений и токов при ОЗЗ.

Эффективное ограничение емкостных токов и перенапряжений, возникающих при ОЗЗ, возможно только при правильном выборе параметров ДГР, резисторов, системы регулирования. Выбор и настройка параметров ДГР и резисторов на основе выводов и соотношений, полученных по упрощенным схемам и моделям, не обеспечивают требуемой точности результатов, что является одной из причин низкой эффективности применения этих средств.

Применение разработанных математических моделей для решения задач выбора средств ограничения емкостных токов и перенапряжений при ОЗЗ позволяет определять их параметры с более высокой точностью, что, в свою очередь, обеспечивает более эффективное их использование.

Одной из причин низкой эффективности применения ДГР является также и то, что требуют совершенствования технические средства, применяемые для ограничения емкостных токов и перенапряжений, отсутствует системный подход к решению проблемы компенсации и защиты от ОЗЗ. Полученные в работе результаты позволяют сформулировать требования к средствам измерения емкостных токов и автоматического регулирования настройки ДГР, необходимые для разработки их с учетом условий реальной эксплуатации.

Для ограничения емкостных токов при резонансном заземлении нейтрали необходимо обеспечить их точное определение. Расчетные и экспериментальные методы определения параметров ВЛ и КЛ и емкостных токов, выбора и настройки средств компенсации не обеспечивают требуемой точности, и эта ситуация закреплена соответствующими нормативными документами, поэтому есть необходимость внесения изменений в нормативные документы.

Разработанные в диссертации математическая модель и программные средства могут быть использованы для выбора заземляющих резисторов и для оценки эксплуатационного ресурса ограничителей перенапряжений.

Разработанная в диссертационной работе математическая модель электрической сети 6–10 кВ позволяет анализировать электромагнитные переходные процессы при замыканиях на землю, оценивать величины токов и перенапряжений, определять области применения сетей с различными режимами нейтрали, выбирать средства ограничения токов и перенапряжений.

Ключевые слова: электрическая сеть, электромагнитные переходные процессы, фазные координаты, перенапряжение, нейтраль, замыкание на землю, дугогасящий реактор.

Lebedka S.M. Models and methods for evaluating and selecting options resonance and impedance earthed neutral cable networks 6-10 kV. Manuscript.

The dissertation is presented for Ph.D degree receiving in the specialty 05.14.02 – power plants, networks and systems. – National technical university “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2013.

The dissertation is devoted to the development of mathematical models for the study of electromagnetic transients in electric networks 6-10 kV to refine your limit of capacitive currents and surges at short circuits on the ground in networks with different ways of neutral grounding and requirements to them, thus enhancing efficiency.

In work the model of an electric network 6-10 kV with use diakoptical a method is developed. On the basis of the equations in phase coordinates discrete mathematical models of three-phase elements of networks 6-10 kV with use of an implicit method of integration are received.

Model of a network 6-10 kV and software allow to analyze electromagnetic transients at short circuits on the ground, to determine scopes of networks with various modes neutral, to choose means of restriction of currents and overvoltage.

Computing experiments in networks 6-10 kV an any configuration with a different mode neutral, a design, length, means of restriction of currents and overvoltage are carried out.

Proposed the efficiency measures and methods of limiting capacitive currents and surges in electric networks 6-10 kV.

Key words: electric network, electromagnetic transients, phase coordinates, overvoltage, neutral, short circuit on the ground, the arch to extinguish a reactor.