

П. Д. Лежнюк, М. В. Кутіна

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗАХИСТУ
ВІД ОБРИВУ ПРОВОДУ
ТА ПОШУК МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ
В РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ
ЗІ СКЛАДНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ
НАПРУГОЮ 6-35 кВ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

П. Д. Лежнюк, М. В. Кутіна

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ
ЗАХИСТУ ВІД ОБРИВУ ПРОВОРДУ
ТА ПОШУК МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ
В РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ ЗІ СКЛАДНОЮ
ТОПОЛОГІЄЮ НАПРУГОЮ 6–35 кВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 621.925:621.315.1
ББК 31.279
Л40

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 26.06.2013 р.)

Рецензенти:

О. М. Сінчук, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

Лежнюк, П. Д.

Л40 Методи і засоби захисту від обриву проводу та пошук місця пошкодження в розподільній мережі зі складною топологією напругою 6–35 кВ : монографія / П. Д. Лежнюк, М. В. Кутіна. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 152 с.

ISBN 978-966-641-561-8

В монографії розглядаються питання релейного захисту та автоматики розподільних електричних мереж зі складною топологією напругою 6–35 кВ. Запропоновано метод виявлення обриву проводу та автоматизації процесу пошуку місця обриву в розподільній мережі 6–35 кВ. Розроблено математичну модель для визначення перехідного опору в місці падіння проводу на землю. Розроблено автоматизовану систему керування аварійним режимом обриву проводу, та пошуку місця пошкодження. Розрахована на фахівців з релейного захисту та автоматики електричних розподільних мереж.

УДК 621.925:621.315.1
ББК 31.279

ISBN 978-966-641-561-8

© П. Лежнюк, М. Кутіна, 2014

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1 Постановка задачі і визначення шляху її розв'язання	8
1.1 Загальна характеристика об'єкта дослідження	8
1.2 Аналіз існуючих методів і засобів захисту розподільних повітряних мереж напругою 6–35 кВ від несиметричних режимів роботи	14
1.3 Аналіз існуючих методів і засобів захисту від однофазних замикань на землю	19
1.4 Аналіз існуючих методів і засобів пошуку пошкодження в розподільних мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 6–35 кВ	24
2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАХИСТУ ВІД ОБРИВУ ПРОВОДУ РОЗГАЛУЖЕНОЇ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАПРУГОЮ 6–35 КВ	28
2.1 Параметри і ознаки, які характеризують обрив проводу повітряної ЛЕП до моменту падіння його на землю	28
2.1.1 Визначення часу падіння проводу на землю	30
2.1.2 Визначення струмів прямої та зворотної послідовностей у випадку обриву проводу	34
2.2 Параметри і ознаки, які характеризують обрив проводу повітряної ЛЕП після моменту його падіння на землю	38
2.2.1 Визначення перехідного опору в місці падіння проводу	38
2.2.2 Дослідження струмів замикання на землю при обриві проводу в різних місцях прольоту	45
2.3 Вдосконалення методу захисту при обриві проводу повітряної РЕМ напругою 6–35 кВ	52
2.3.1 Принцип дії захисту при обриві фазного проводу повітряної РЕМ напругою 6–35 кВ	52
2.3.2 Вибір уставок спрацювання захисту при обриві фазного проводу повітряної РЕМ напругою 6–35 кВ	55
3 ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ОБРИВУ ПРОВОДУ ЛОКАЦІЙНИМ МЕТОДОМ В РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ЗІ СКЛАДНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ НАПРУГОЮ 6–35 КВ	62

3.1 Теоретичне обґрунтування доцільності використання локаційного вимірювання на лініях з деревоподібною топологією напругою 6–35 кВ для визначення місця обриву проводу	62
3.2 Вплив величини активного навантаження на форму відбитого імпульсу	68
3.3 Вплив величини ємнісного навантаження на форму відбитого імпульсу	76
3.4 Вплив величини індуктивного навантаження на форму відбитого імпульсу та дослідження імпульсної реакції реальних трансформаторів	79
3.5 Методи розшифрування рефлектограм	83
4 ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВАРІЙНИМ РЕЖИМОМ ОБРИВУ ФАЗНОГО ПРОВОДУ (АСКАРОП) ТА ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	87
4.1 Вибір структури автоматизованої системи керування.....	87
4.2 Розробка пристрою релейного захисту від обриву проводу	92
4.3 Мікропроцесорна реалізація пристрою захисту від обриву проводу	95
4.4 Розробка засобів визначення місця пошкодження локаційним методом.....	98
4.5 Методика розрахунку ефективності застосування комплексу засобів захисту від обриву проводу та локаційного методу пошуку місця пошкодження.....	104
ВИСНОВКИ.....	116
ЛІТЕРАТУРА	118
Додаток А. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПЛЕП 10 КВ ПАТ «ВІННИЦЯОБЛЕНЕРГО»	129
Додаток Б. КОЕФІЦІЄНТИ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ КОНТУРНИХ СТРУМІВ ДО МОМЕНТУ ПАДІННЯ ПРОВОДУ НА ЗЕМЛЮ В МАТНСАД	148
Додаток В. РОЗРАХУНКОВІ ЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ У ФАЗАХ ТА В МІСЦІ ЗАМИКАННЯ ПРИ ОБРИВІ ПРОВОДУ	150

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АВР – автоматичне введення резерву
- АПВ – автоматичне повторне вмикання
- АСКАРОП – автоматизована система керування аварійним режимом обриву проводу
- ВМП – визначення місця пошкодження
- ГД – граничнодопустиме значення
- ЕРС – електрорушійна сила
- ЗС – зовнішнє середовище
- КЛ – кабельна лінія
- ЛЕП – лінія електропередач
- МСЗ – максимальний струмовий захист
- НД – нормально допустиме значення
- ОВБ – оперативно-виїзна бригада
- ОЗЗ – однофазне замикання на землю
- ПАР – параметри аварійного режиму
- ПВ – повторне вмикання
- ПКЗ – покажчики короткого замикання
- ПЛ – повітряна лінія
- РЕМ – розподільна електрична мережа;
- РЗА – релейний захист і автоматика
- РМ – розподільна мережа
- СВ – струмова відсічка
- СЕП – система електропостачання
- ТП – трансформаторна підстанція

ВСТУП

Найбільш ненадійним елементом системи електропостачання є повітряні лінії електропередачі напругою 6–35 кВ, які мають деревоподібну топологію. При віддалених к. з. і пошкодженнях за трансформаторами в повітряних лініях напругою 6–35 кВ струми к. з. мало відрізняються від струмів навантаження [1–3]. Особливо небезпечним є аварійний режим, який супроводжується обривом фазного проводу. Струмові захисти від несиметричних режимів на цей вид пошкодження не реагують. Після падіння проводу на землю виникає однофазне замикання на землю (ОЗЗ) через значний перехідний опір. Існуючі засоби від ОЗЗ надійно спрацьовують тоді, коли перехідний опір не перевищує 1 кОм, і діють на сигнал. Процес пошуку пошкодження характеризується низьким рівнем автоматизації і може тривати протягом декількох годин. За цей час в місці падіння проводу відбувається «спікання» ґрунту, що призводить до різкого зростання перехідного опору. Захист від ОЗЗ перестає діяти і небезпечне поле розтікання струму може існувати протягом невизначеного часу. Несиметричний режим роботи мережі негативно впливає на роботу споживачів, особливо двигунів [4–6].

Значний внесок в розробку методів і засобів захисту розподільних мереж напругою 6–35 кВ від несиметричних режимів роботи та визначення місця пошкодження зробили вчені А. І. Айзенфельд, В. А. Андреев, В. А. Борухман, Я. С. Гельфанд, І. В. Карпов, А. В. Кириленко, В. М. Кутін, П. Д. Лежнюк, Ф. А. Ліхачов, Р. Г. Мінуллін, В. В. Назаров, І. М. Сирота, Р. Ф. Стасенко, А. М. Федосєв, Е. Ф. Цапенко, М. А. Шабад, Г. М. Шалит, Ф. П. Шкрабець та інші.

Таким чином, розвиток теорії побудови ефективних методів захисту від обриву фазного проводу повітряних ліній електропередачі з деревоподібною топологією і автоматизація процесу пошуку пошкодження під час їх експлуатації дозволять збільшити рівень надійності, безпеки і ефективності експлуатації електричних мереж, що є актуальною науково-прикладною задачею.

У першому розділі показано, що розподільні мережі (РМ) напругою 6–35 кВ з повітряними лініями електропередач (ПЛЕР) є складною системою. Вони розподілені в просторі, мають деревоподібну структуру, є неоднорідними, а відмова в електропостачанні призводить до значних збитків. Розподільні мережі характеризуються несиметричним навантаженням фаз, різноманітністю і нерівномірністю добового навантаження та режимом заземлення нейтралі, мають низький рівень надійності. Проведено аналіз існуючих методів і засобів

захисту розподільних мереж від несиметричних режимів роботи мережі.

У другому розділі виконано розрахунки параметрів аварійного режиму роботи реальних ліній ПАТ «Вінницяобленерго» напругою 10 кВ за максимального та мінімального навантаження. Запропоновано математичні моделі для визначення перехідного опору в місці падіння проводу на землю, яка враховує кліматичні умови, довжину проводу, що лежить на землі, параметри ЛЕП та струму витоку на землю. Здійснено експериментальну перевірку адекватності математичної моделі визначення перехідного опору в місці падіння проводу на землю.

За результатами проведених досліджень запропоновано захист від обриву проводу, здійснено розрахунок уставок спрацювання захисту.

У третьому розділі розглянуто доцільність застосування локаційного методу в умовах розподільної мережі з складною деревоподібною топологією, яку мають мережі напругою 6–35 кВ.

Проведено дослідження імпульсних реакцій на навантаження різного типу. Для розшифрування рефлектограм при визначенні місця пошкодження (ВМП) запропоновано різницевий метод. Він дозволяє визначити місце обриву проводу без детального розшифрування рефлектограми.

У четвертому розділі запропоновано автоматизовану систему керування аварійним режимом обриву проводу, а також реалізацію захисту від обриву проводу на мікроелектронній та мікропроцесорній базах.

Розроблено алгоритм функціонування автоматизованої системи керування аварійним режимом обриву проводу

Для зменшення похибки визначення місця обриву в розгалужених електричних мережах з високою неоднорідністю, пропонується алгоритм, в якому застосовано перетворення Фур'є, що дозволяє усунути завади.

Запропоновано методику оцінювання ефективності АСКАРОП. Оцінювання ефективності застосування АСКАРОП здійснюється шляхом порівняння її з двома базовими варіантами: застосування пристроїв, що ґрунтуються на використанні вищих гармонік в струмі нульової послідовності при ОЗЗ, («Поиск-1», «Волна», «Зонд», «ВП-1» та інші), та методом послідовного ділення мережі з оптимальною послідовністю перевірок при виникненні міжфазних к. з. та ОЗЗ.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ І ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХУ ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ

1.1 Загальна характеристика об'єкта дослідження

СЕП напругою 6–35 кВ за функціональним призначенням поділяють на міські, сільські та промислових підприємств. В містах та на промислових підприємствах мережі цього класу напруги виконуються переважно на основі кабельних ліній (КЛ), в сільській місцевості – на основі повітряної лінії (ПЛ), існують і змішані ділянки, що складаються з КЛ і з ПЛ [1, 2].

В загальному випадку в СЕП 6–35 кВ використовують різноманітну комутаційну апаратуру. Потужність трансформаторів може складати від 63 до 250 кВА в сільській місцевості, від 250 до 2500 кВА на великих промислових підприємствах. Марки проводів на різних ділянках мережі однієї напруги різні (АС-35, АС-50, АС-70). Кількість різнотипних проводів, що використовують на окремому приєднанні, може змінюватись від 2 до 6. Використання роз'єднувачів та вимикачів різних типів, компенсаційних пристроїв, засобів автоматики у вигляді пристроїв АВР та АПВ, вимірювальних приладів ще більше ускладнює конструктивне виконання таких систем. Найбільш неоднорідними, з цієї точки зору, є СЕП сільськогосподарського призначення [3, 4].

Структура СЕП 6–35 кВ впливає на засоби релейного захисту і автоматики (РЗА) та точність методів визначення місця пошкодження (ВМП). Розподільні мережі (РМ) цього класу напруги є складною системою, вони розподілені в просторі, мають деревоподібну структуру, автономні, відмова в електропостачанні призводить до значних збитків [4]. В більшості випадків кількість ієрархічних рівнів складає 4–6, в залежності від призначення РМ. На рис. 1.1 наведена схема, що ілюструє структуру таких електричних мереж. В процесі захисту від аварійних режимів і пошуку місць ОЗЗ складна структура та розгалуженість ПЛ стають причинами невизначеності, особливо при обриві проводу, якщо він відбувся не на початку лінії, і має до місця обриву відгалуження.

Режим роботи СЕП 6–35 кВ характеризується несиметричністю навантаження фаз, різноманітністю і нерівномірністю добового навантаження та режимом заземлення нейтралі трансформаторів. Ці, та багато інших факторів суттєво впливають на ефективність застосування методів ВМП, оскільки врахування їх впливу є на даний час складною задачею, наприклад, несиметрія навантаження призводить до викривлення параметрів за якими розраховується відстань до місця пошкодження при використанні дистанційних методів ВМП [4, 5].

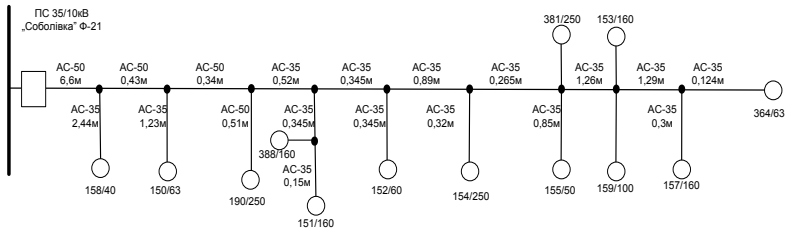


Рисунок 1.1 – Розгалужена РМ 10 кВ

Особливу складність відрізняється режим ОЗЗ, який супроводжується розривом фазного проводу в ПЛІ і падінням його на землю. Режим нейтралі дозволяє релейному захисту діяти на сигнал і довгий час не вимикати ОЗЗ, що досить часто призводить до значних пошкоджень ізоляторів, загоряння опор, пошкодження заземлення опор, створює небезпечне поле розтікання струму, в яке можуть потрапити тварини чи люди, впливає на умови роботи вимірювальних приладів та пристроїв релейного захисту і автоматики [6]. В більшості випадків на такий вид пошкодження не реагує жоден із захистів від замикання на землю. Тривале існування такого режиму є досить небезпечним. Тому існує необхідність вдосконалення методів попередження та засобів захисту від обриву проводу.

Найбільш ненадійною частиною розподільної мережі є провідники повітряних ліній електропередачі. Встановлено [2–7], що основними причинами пошкоджень провідників є зовнішні чинники: грозові перекриття ізоляції, відкладення, навантаження від вітру, вібрація мереж, загоряння дерев'яних опор, послаблення механічної міцності, пошкодження опор та мереж автотранспортом і різними механізмами. Зовнішні збурювальні дії призводять до перекриття ізоляції, розриву ізоляторів, оплавлення механічних елементів, обриву провідників, послаблення їх механічної міцності під час вібрації та коливання в результаті розлому окремих провідників, пошкодження елементів, падіння опор разом з провідниками. Найбільш важкі наслідки викликають відкладення ожеледі.

Порушення нормальної роботи ПМ пов'язане з такими факторами: неправильне використання електрообладнання, дефекти, які були допущені при виготовленні опор, ізоляторів, перевищення фактичних зовнішніх навантажень розрахункових значень, порушення правил монтажу та спорудження ПМ, недоліки існуючої системи обслуговування та іншими. Для отримання кількісної характеристики пошкоджень елементів ПМ були опрацьовані статистичні дані причин пошкоджень повітряних РМ напругою 10 кВ, зібрані у ПАТ «Вінницяобле-

нерго» за 2009 р. Кількість пошкоджень за рік становила 1492. В табл. 1.1 наведено причини їх виникнення.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика відключень ПЛЕП 6–10 кВ через пошкодження обладнання в РМ ПАТ «Вінницяобленерго» за 2009 р.

5461	Всього відключень		Відключення через пошкодження ЛЕП																	
			Всього						Елементів ПЛ						Кабельних вставок					
	Відключення без пошкодження ЛЕП з успішним АПВ і РПВ		Опор		Проводу		Ізоляції		Арматури кріплення		Інше		Кабело		Муфти з'єднувальної, кінцевої		Інше			
	К-сть	%																	К-сть	%
3969			122		414		552		130		154		35		2,35		66		19	
72,68			8,18		27,75		37		8,71		10,32		2,35		4,42		4,42		1,27	
1492																				
27,32																				

Як видно з таблиці 1.1, пошкодження проводу є одним з найчастіших видів пошкоджень (27,75 %).

Статистичні дані за видами технологічних порушень наводяться в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація основних причин технологічних порушень при обслуговуванні повітряних ЛЕП 6–10 кВ в розподільних мережах ПАТ «Вінницяобленерго» за 2009 р.

4173	Всього порушень	Стихійні явища						Інші												
		Недоліки тех. обслуговування та ремонту	Помилкові дії персоналу	Хвибна дія РЗА	Грозові перенапруги	Сильний вітер	Ожеледь	Інші	Забруднення ізоляції	Падіння дерев	Дефекти монтажу	Дії сторонніх осіб, організацій	Ненормальний режим роботи ЛЕП	Через пошкодження на суміжних ділянках ПЛ	Пошкодження обладнання ПС	Нез'ясовані причини	Інші			
16																				
1																				
44																				
720																				
792																				
195																				
210																				
105																				
240																				
17																				
70																				
6																				
25																				
214																				
1263																				
255																				

Що ж до наслідків виникнення пошкоджень, то кількість пошкоджень, які супроводжувались стійкими ОЗЗ, є найбільшою і складає 63,2 %, міжфазних коротких замикань – 9,7 %, подвійних замикань на землю – 5,2 %, інші – 21,9 %.

Характерними пошкодженнями мережі є накиди, розриви або перекриття окремих проводів, сліди перекриття, зміна стріли провисання, корозія проводів, пошкодження проводів біля затискувачів та з'єднань.

В СЕП відмови можуть бути повними або частковими, стійкими і нестійкими, розрізняють також раптові відмови та передбачені вимкнення. Вважають [3, 4], що збитки від передбачених вимкнень в РМ приблизно в три рази менші, ніж від виникнення раптових відмов.

В середньому за 2008–2009 р. р. питома кількість пошкоджень ПЛ 6–10 кВ ПАТ «Вінницяобленерго» складає 0,17 пошкоджень на 1 км довжини РМ за рік.

За даними, що отримані багатьма дослідниками, ВЛ пошкоджуються поблизу опор значно частіше, ніж в проміжній частині прольоту. Ця обставина є важливою при оцінюванні очікуваних значень перехідних опорів у місці ОЗЗ.

Особливою складністю відрізняється режим ОЗЗ, який виникає при обриві фазного проводу повітряних ЛЕП, як уже відмічалось, найбільш небезпечним є обрив проводу, який виникає в прольоті зі сторони джерела живлення у випадку падіння проводу на землю. Струм при замиканнях на землю однієї фази незначний, а міжфазні напруги залишаються без змін. В цьому випадку пошкоджена лінія не відключається засобами РЗА. Тому такий режим роботи є тривалим у часі і дуже небезпечним, він утворює небезпечне поле розтікання струму в місці падіння проводу, яке загрожує життю тварин і людей, супроводжується перенапругами які, призводять до пошкодження ізоляторів, загорання опор, пошкодження заземлення опор, виникнення пожеж. Несиметричні режими живлення двигунів спричиняють пошкодження і брак на виробництві. Перехідний опір в місці падіння проводу на землю є нестійким і значним за величиною. Він може коливатись від декількох десятків Ом до МОм. Існуючі засоби від ОЗЗ забезпечують необхідну чутливість при перехідному опорі до 1 КОм [7]. Процес пошуку пошкодження багатокроковий, тому аварійний режим є тривалим. Виходячи з цього, існує необхідність дослідження режиму ро-

боти РМ при обриві проводу і розробки засобів захисту від обриву проводу.

Для обґрунтування відміченого вище, проведемо розрахунок поля розтікання струму в результаті розриву проводу і падіння його на землю.

Рівняння потенціальної кривої вздовж проводу (вісь ox), можна визначити як [8, 9]

$$\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + d^2} + 2x}{\sqrt{l^2 + d^2} + 2x - 2l}, \quad (1.1)$$

де I_3 – струм замикання на землю, А; ρ – питомий опір землі, Ом·м; l – довжина проводу, що лежить на землі, м; d – діаметр проводу, що лежить на землі, м.

За умови $l \gg d$ (1.1) можна записати:

$$\varphi_x = \frac{I_3 \rho}{2\pi l} \ln \frac{l + 2x}{2x - l}. \quad (1.2)$$

Рівняння потенціальної кривої вздовж осі oy перпендикулярної проводу [9]

$$\varphi_y = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + 4y^2} + l}{2y}. \quad (1.3)$$

Загальний потенціал проводу матиме вигляд

$$\varphi_{\Pi} = \frac{I_3 \rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}. \quad (1.4)$$

Напругу кроку визначимо як

$$U_k = \varphi_{\Pi} \beta, \quad (1.5)$$

де $\beta = \frac{(\varphi_x - \varphi_{x+a})}{\varphi_{\Pi}} > 1$ – коефіцієнт напруги кроку, який враховує форму потенціальної кривої.

Струм, що проходить через тіло людини, визначимо як

$$I_h = \frac{U_k}{R_h}, \quad (1.6)$$

де R_h – опір тіла людини.

Для кількісної оцінки, скориставшись виразом (1.4), розрахуємо потенціал проводу, що лежить на землі (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Значення потенціалу проводу в «В», який лежить на землі, для мережі 6–10 кВ з ізолюваною нейтраллю

Характеристика ґрунту	Довжина проводу, що лежить на землі, м	Діаметр проводу 0,0084 м. Марка проводу АС-35			Діаметр проводу 0,0096 м. Марка проводу АС-50		
		Струм замикання на землю 0,3 А	Струм замикання на землю 0,5 А	Струм замикання на землю 1 А	Струм замикання на землю 0,3 А	Струм замикання на землю 0,5 А	Струм замикання на землю 1 А
Глина 45 Ом•м	1	23,448	39,08	78,16	22,88	38,126	76,253
	42	0,94	1,566	3,132	0,926	1,543	3,087
Суглинок 91 Ом•м	1	47,654	79,42	158,847	46,49	77,486	154,971
	42	1,91	3,183	6,365	1,882	3,136	6,273
Пісок 524 Ом•м	1	273,84	456,4	912,794	267,2	445,26	890,523
	42	10,973	18,29	36,576	10,81	18,023	36,046

Розрахуємо струм, що пройде через тіло людини по шляху «нога-нога», вираз (1.6), при умові, що струм замикання на землю 1 А, опір тіла людини 1 кОм [10], довжина проводу, що лежить на землі, 1 м, (таблиця 1.4).

Таблиця 1.4 – Значення струму в «А», що проходить через тіло людини, яка знаходиться на відстані h від проводу, що впав на землю

Відстань між проводом і людиною h , м	Характеристика ґрунту		
	Глина, 45 Ом м	Суглинок, 91 Ом м	Пісок, 524 Ом м
1	0,027	0,055	0,317
2	$3,61 \cdot 10^{-3}$	$4,299 \cdot 10^{-3}$	0,042
3	$1,447 \cdot 10^{-3}$	$2,927 \cdot 10^{-3}$	0,017
4	$7,815 \cdot 10^{-4}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$
5	$4,895 \cdot 10^{-4}$	$9,898 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
6	$3,355 \cdot 10^{-4}$	$6,784 \cdot 10^{-4}$	$3,906 \cdot 10^{-3}$
7	$2,443 \cdot 10^{-4}$	$4,94 \cdot 10^{-4}$	$2,845 \cdot 10^{-3}$
8	$1,858 \cdot 10^{-4}$	$3,758 \cdot 10^{-4}$	$2,164 \cdot 10^{-3}$

Для практичних цілей використовують безпечно значення струму 50–75 мкА; струм невідпускання становить 3–5 мА при частоті змінного струму 50 Гц [11, 12]. Як видно з таблиці, при падінні проводу на землю на відстані від проводу до 8 м, усі значення струмів перевищують значення безпечного струму. Це свідчить про значну загрозу життю людини при потраплянні її в поле розтікання струму.

Аварійний режим роботи при обриві проводу становить не тільки небезпеку для здоров'я і життя людей, а також призводить до руйнування ізоляції та виходу з ладу обладнання. В період виконання робіт обслуговуючим персоналом на ввімкнутій ПЛ можуть виникати перенапруги в результаті різкої зміни режиму роботи мережі. Найбільш небезпечними внутрішніми перенапругами за умовами дії на лінійну ізоляцію є перенапруги, викликані в результаті виникнення однофазних замикань на землю через дугу в мережах з ізолюваною нейтраллю. Внутрішні перенапруги мають коливальний характер, їх тривалість знаходиться в широких межах, вони можуть поширюватись на всю систему або лише на обмежену її частину, і становлять 2,5–4 від фазної напруги [13–17]. Тому існує необхідність у негайному вимкненні лінії, на якій виник аварійний режим через обрив проводу.

1.2 Аналіз існуючих методів і засобів захисту розподільних повітряних мереж напругою 6–35 кВ від несиметричних режимів роботи

Повітряні розподільні мережі напругою 6–35 кВ широко застосовують для сільської електрифікації і на промислових підприємствах. Особливі труднощі виникають при виконанні захисту від несиметричних режимів роботи в мережах сільської електрифікації, які розподілені в просторі, мають деревоподібну структуру і малий переріз сталевих проводів на віддалених ділянках. Це призводить до того, що рівень струмів к. з. наближається до рівня струмів навантаження на головних ділянках ПЛ. Захист в повітряних РМ виконують у вигляді двоступеневого максимального струмового захисту (МСЗ) [15, 16].

Для ПЛ довжиною декілька кілометрів проблеми забезпечення чутливості і селективності вирішуються існуючими засобами захисту. Значні труднощі виникають при виборі типу захисту при наявності секційних вимикачів ПЛ 6–10 кВ з резервуванням [18]. На цих вимикачах необхідно обслуговувати два комплекти МСЗ з різним рівнем чутливості і швидкодії, вмикання і вимикання яких здійснюється автоматично за допомогою органа спрямування потужності, або логічних органів, що реагують на наявність чи відсутність напруги на шинах підстанції.

Для реалізації МСЗ використовується різна елементна база, починаючи з реле прямої дії типу РТМ, РТВ. В наш час впроваджуються реле на мікроелектронній базі, наприклад, двофазний пристрій максимального захисту з залежною і незалежною витримкою часу та струмовою відсічкою РС80М2, який є функціональним аналогом двох електромеханічних реле РТ 80, 90 і забезпечує заміну РТ 80, 90 з контактною комутацією при струмах до 200 А [19].

В розподільних повітряних мережах сільськогосподарського призначення в багатьох випадках виникають труднощі узгодження МСЗ з залежною характеристикою запобіжників, які використовують для захисту трансформаторів потужністю 250 кВА і більше. В цьому випадку часові характеристики МСЗ на вводах і лініях напругою 6–10 кВ, які відходять від шин підстанції, повинні узгоджуватись з характеристиками плавких вставок запобіжників як зі сторони вищої напруги, так і понижувальних трансформаторів 6–10 кВ [18]. І в тих випадках, коли збільшення струму і часу дії МСЗ недопустимі, дозволяється не-селективна дія захисту, яка виправляється автоматом повторного вмикання (АПВ) [16].

В мережах, які живлять потужних споживачів (птахоферми, тваринницькі комплекси) навантаження двигунів практично таке ж, як і на промислових підприємствах. В середньому ж для мереж сільськогосподарського призначення навантаження двигунів невелике, а тому коефіцієнт самозапуску при розрахунку струму спрацювання захисту приймається $K_{с.з.} = 1,1 - 2$ [18] при мінімальному часі спрацювання захисту 0,5 с. Струмова відсічка має обмежене застосування, оскільки її потрібно відстроювати від ближньої до головної ділянки трансформаторної підстанції і сумарного кидка струму намагнічення трансформаторів всіх ТП, що живляться від лінії. В цьому випадку неселективність дії при пошкодженні одного з трансформаторів може бути виправлена в циклі АПВ ПЛІ, якщо струм спрацювання відсічки узгоджений з характеристикою плавкої вставки запобіжника [18].

Сьогодні в повітряних мережах широко застосовують вакуумні вимикачі з електромагнітним приводом, який живиться за допомогою вмонтованого блока живлення, що під'єднується до трансформаторів струму і напруги. На закритих підстанціях 10 кВ використовують комірки типу КСО [19].

В повітряних розподільних мережах промислових підприємств навантаження двигунів є значним, це призводить до необхідності застосовувати менш чутливий захист, оскільки збільшується коефіцієнт самозапуску і час спрацювання, що призводить до зниження напруги протягом тривалого часу та не забезпечує самозапуску у випадку к. з. на шинах відповідальних синхронних двигунів. Крім цього, необхідно при розрахунку струмів к. з. враховувати додаткове живлення від двигунів, що особливо важливо при виборі уставок швидкодійних захистів.

Для підвищення чутливості МСЗ при несиметричних к. з. в мережах 6–10 кВ запропоновано використовувати захист, який реагує на струми зворотної послідовності [20–22]. Перевагою такого захисту є те, що можна не враховувати струмів нормального режиму ПЛІ. Разом

з тим, завдяки існуванню заземлених нейтралей трансформаторів на приймальних підстанціях при зовнішніх несиметричних к. з., наприклад, в мережі 110–220 кВ, струм зворотної послідовності з'являється і в мережі 6–10 кВ. Відстроюватись від цих струмів можна шляхом вибору відповідного струму спрацювання чи витримки часу, або застосування реле потужності, але відстроювання за струмом зворотної послідовності не підвищує чутливість МСЗ в порівнянні із захистом, який реагує на повні струми [23]. Чутливий неспрямований струмовий захист зворотної послідовності можна застосувати, якщо відстроюватись за часом від захисту мережі, який реагує на несиметричні к. з. попередніх приєднань. Наприклад, на рисунку 1.2 показана схема мережі, де струмовий захист зворотної послідовності облаштовується на ПЛ 6–10 кВ.

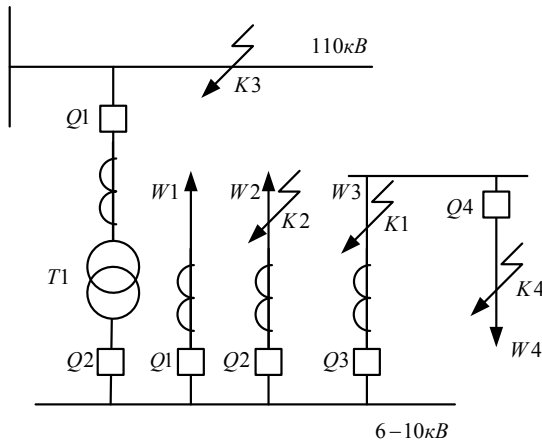


Рисунок 1.2 – Схема мережі для аналізу ефективності застосування струмового захисту зворотної послідовності

Для захисту лінії W1 від зовнішніх несиметричних к. з., струм зворотної послідовності, що протікає по W1, буде максимальним, у випадку к. з. в точках K2 і K3. Якщо не відстроювати захист лінії W1 від найбільшого струму зворотної послідовності I_2 , то витримка часу його повинна бути більшою, ніж час спрацювання резервного захисту трансформатора T1 і ПЛ 110 кВ. При несиметричному к. з. на лінії W3, струм зворотної послідовності на непошкоджених лініях W1 і W2 зменшується, коли точка к. з. віддаляється від шин. Якщо відстроюватись від лінії W3 за часом, то чутливість струмового захисту зворотної послідовності ліній W1 і W2 можна вибрати за значенням струму в

непошкодженій лінії при несиметричному к. з. в кінці зони МСЗ лінії W3, коли струм зворотної послідовності непошкоджених ліній має відносно невелике значення [21–24]. Якщо розглядати доцільність застосування чутливого захисту зворотної послідовності на лінії W3, при к. з. на лінії W4, то умовою її селективності є відстроювання за чутливістю і часом від захисту зворотної послідовності лінії W4, що призводить до зменшення чутливості і збільшення часу спрацювання захисту лінії W3. Отже підвищення чутливості струмового захисту зворотної послідовності забезпечується лише на лініях, які відходять від однієї системи шин і є несекціонованими, тобто, на лініях, які живлять зосереджене навантаження, наприклад, потужні електродвигуни.

Більш досконалим за чутливістю та швидкодією є термінал інтегрованого захисту і автоматики вводів напругою 6–35 кВ типу «Сіріус В» [25]. Він виконує функції захисту від несиметричних режимів та обриву фази і реагує на струм зворотної послідовності, але він не відрізняє обриву фази від міжфазного к. з. в електричній мережі, і діє на вимкнення зі значною витримкою часу. Аналогічно працює захист від несиметричних режимів в складі мікропроцесорного терміналу НТЦ «Мехатроніка».

Розподільні повітряні мережі сільськогосподарського призначення мають деревоподібну структуру, тобто, навантаження розподілене в просторі, з іншого боку, струми зворотної послідовності при виникненні міжфазних к. з. мають на декілька порядків більше значення, ніж струм зворотної послідовності при обриві проводу (додаток А). Тому існуючі засоби захисту від несиметричних режимів не забезпечують необхідної чутливості до такого виду пошкодження в повітряній мережі з деревоподібною конфігурацією як обрив проводу. Оскільки після обриву фази, провід падає на землю і виникає ОЗЗ, то вважають, що цей вид пошкодження може виявити захист від ОЗЗ.

Відомі також пристрої захисту від обриву проводу [26–29], які використовують ознаку знеструмлення пошкодженої фази. На рисунку 1.3 представлено функціональну схему пристрою захисту від обриву проводу [26, 28]. Вона складається з первинних перетворювачів сигналів – трансформаторів струму і напруги 1, 2, 3, увімкнених у фази захищеної електричної мережі – перетворювачів змінної напруги в постійну 4–6, виходи яких з'єднані з відповідними входами блока 7 (логічний елемент І) і 8 (логічний елемент АБО). Блоки 7 і 8 під'єднані до відповідних входів блока 9 (логічний елемент І-НІ) і блока 10 (елемент затримки сигналу), які послідовно з'єднані з блоком 11 (логічна схема збігу І на два входи) і вихідним блоком 12.

Коли пошкодження відсутнє, на входи перетворювачів змінної напруги в постійну 4–6 надходять сигнали, які пропорційні струмам у

фазах. Вони випрямляються, обмежуються за величиною у вигляді безперервної логічної одиниці, надходять на три входи схеми збігу 7 і логічного елемента 8, відповідно. На виходах елементів 7 і 8 з'являються сигнали логічної одиниці, що надходять на два входи логічного елемента І-НІ 9, при цьому з його виходу сигнал логічного нуля надходить на перший вхід схеми збігу 11. На його другий вхід надходить сигнал логічної одиниці з виходу логічного елемента АБО 8 через елемент затримки часу 10. У цьому випадку на вхід вихідного блока сигнал не надходить і команда на вимкнення вимикача Q не формується. Елемент затримки сигналу 10 виключає помилкову роботу пристрою при різночасності замикання контактів силового вимикача при ввімкненні лінії в роботу.

У випадку обриву проводу однієї з фаз ЛЕП зникне сигнал на одному з виходів схеми збігу 7 і логічного елемента 8, тому на виході елемента 7 сигнал логічної одиниці зникає, а 8 залишається, запускається вихідний блок 12 і формується сигнал на відключення розподільної мережі.

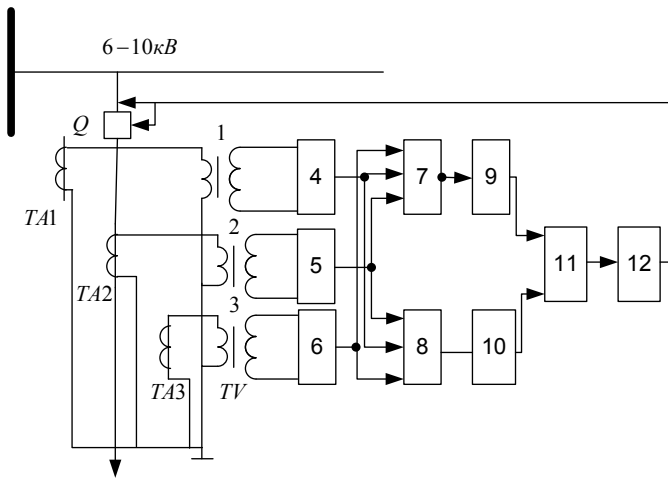


Рисунок 1.3 – Функціональна схема захисту від обриву проводу в розподільній мережі з ізольованою чи компенсованою нейтраллю

Цей захист має обмежене застосування для мереж, які не мають відгалуження. В розподільних мережах з деревоподібною структурою при виникненні пошкодження за першим і наступними відгалуженнями струм в пошкодженій фазі на початку лінії визначається струмом навантаження відгалуження до місця обриву.

1.3 Аналіз існуючих методів і засобів захисту від однофазних замикань на землю

Однофазні замикання на землю є найбільш розповсюдженим видом пошкодження (60–90 % від загальної кількості пошкоджень ЛЕП) в мережах з ізольованою або компенсованою нейтраллю. Опір нульової послідовності в таких мережах визначається, в основному, ємністю ліній електропередачі відносно землі і перехідним опором в місці замикання, тому струми замикання на землю на декілька порядків менші, ніж струми міжфазних к. з. і, в більшості випадків, менші, ніж струми навантаження, особливо в повітряних мережах напругою 6–10 кВ, де ємність мережі відносно землі невелика (0,1–1.0 мкФ).

Причини виникнення ОЗЗ, різноманітні [30, 31], однак, найбільш небезпечним є ОЗЗ, яке супроводжується обривом проводу, оскільки у цьому випадку замикання на землю відбувається через значний активний опір. При цьому напруга на пошкодженій фазі відносно землі не знижується до нуля, а напруга непошкоджених фаз стає більшою від фазної, але меншою ніж міжфазна. Зміну фазних напруг і появу напруги нульової послідовності використовують для виконання захисту від ОЗЗ.

Розглянемо вплив перехідного опору $r_{OЗЗ}$ в місці падіння проводу на величину напруги нульової послідовності U_0 , яка вимірюється за допомогою трансформаторів напруги типу НОМ або НТМИ [30–32]. Схема з'єднання додаткової обмотки трансформатора напруги для вимірювання U_0 та розрахункова схема для визначення напруги нульової послідовності U_0 зображені, відповідно, на рисунку 1.4а, б. Де $Y_A = \frac{1}{r_A} + j\omega C_A$; $Y_B = \frac{1}{r_B} + j\omega C_B$; $Y_C = \frac{1}{r_C} + j\omega C_C$ – комплексні провідності фаз мережі відносно землі; r_A, r_B, r_C – активний опір ізоляції, відповідно, фази мережі відносно землі; C_A, C_B, C_C – ємність фаз мережі по відношенню до землі; r_1, L_1 – внесений активний опір і індуктивність трансформатора напруги контролю ізоляції.

Згідно з [31] для трансформатора типу НТМИ

$$r_1 = \frac{n_1^2 n_2^2 r_\Delta r_\gamma}{n_2^2 r_\Delta + 3n_1^2 r_\gamma}, \quad (1.7)$$

де n_1, n_2 – відповідно, коефіцієнти трансформації між первинною, вторинною основною і додатковою обмотками НТМИ, з'єднаними за схемою «зірка» та «відкритий трикутник».

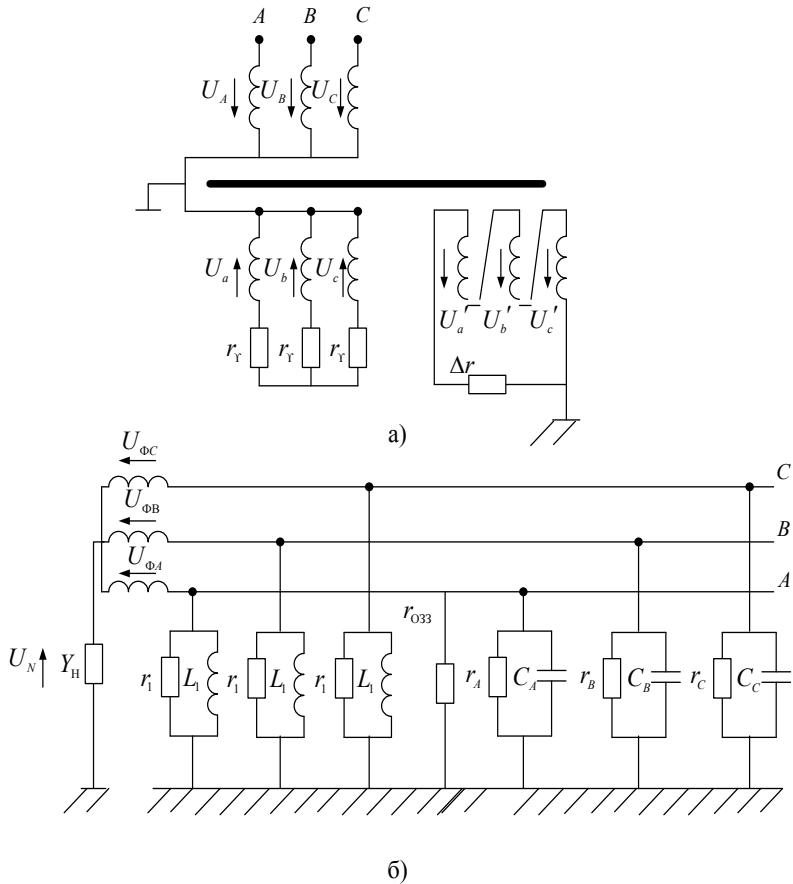


Рисунок 1.4 – Схема з'єднань трансформатора для вимірювання U_0 (а); та розрахункова схема трифазної мережі для визначення U_0 (б)

Якщо вважати, що $C_A=C_B=C_C=C$ і $r_A=r_B=r_C=r$ і виник обрив проводу у фазі A , а при падінні його на землю утворився шунтувальний зв'язок через опір r_{O33} , то комплекс напруги нульової послідовності (див. рис.1.4б) можна визначити як

$$U_0 = \frac{U_\Phi}{n_2} \frac{1/r_{O33}}{1/r_{O33} + 3 \left(1/r_1 + 1/r + \frac{1 - \omega^2 L_1 C}{j\omega L_1} \right) + Y_H}. \quad (1.8)$$

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-561-8>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-561-8>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-561-8>

Наукове видання

**Лежнюк Петро Дем'янович
Кутіна Марина Василівна**

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ВІД ОБРИВУ ПРОВІДУ
ТА ПОШУК МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ
В РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ
ЗІ СКЛАДНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ НАПРУГОЮ 6–35 кВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено М. Кутіною

Підписано до друку 20.03.2014 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,78
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014-09

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідोцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.