

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

В. М. Кутін, В. В. Луцяк

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПОШУКУ ПОШКОДЖЕНЬ
В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ З ПОВІТРЯНИМИ
ЛІНІЯМИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАПРУГОЮ 6–35 КВ**

Монографія

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2011

УДК 621.315.17
ББК 31.279.1
К95

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 9 від 21.04.2011 р.)

Рецензенти

О. Н. Сінчук, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

Кутін, В. М.

К95 Методи та засоби пошуку пошкоджень в розподільних мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 6–35 кВ : монографія / В. М. Кутін, В. В. Луцяк. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 160 с.

ISBN 978-966-641-441-3

Розглянуто методи та засоби пошуку міжфазних КЗ та однофазних замикань на землю в розподільних мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 6–35 кВ та їх розвиток і вдосконалення, дистанційні, топографічні методи та засоби пошуку, а також метод послідовного ділення мережі. Запропоновано інтегровану систему для визначення місця пошкодження.

Книга розрахована на фахівців які займаються проектуванням, виготовленням та експлуатацією засобів автоматизації розподільних мереж напругою 6–35 кВ. Може бути використана студентами, аспірантами та інженерно-технічними працівниками, які обслуговують розподільні електричні мережі.

УДК 621 315 17
ББК 31.279.1

ISBN 978-966-641-441-3

© В. Кутін, В. Луцяк, 2011

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень.....	5
Вступ.....	6
1. Загальна характеристика систем електропостачання (СЕР) як об'єкта пошуку дефектів.....	8
1.1. Види та характер пошкоджень елементів розподільних мереж з повітряними лініями електропередачі.....	8
1.2. Параметри заступної схеми елементів систем електропостачання.....	18
1.3. Умови використання і організація обслуговування систем електропостачання.....	30
1.4. Показники надійності елементів систем електропостачання і їх визначення.....	40
1.5. Класифікація систем визначення місця пошкодження в розподільних мережах.....	50
1.6. Реалізація процедури пошуку в розподільних мережах.....	51
1.7. Аналіз існуючих методів і засобів для визначення місця міжфазних замикань в повітряних лініях електропередачі напругою 6–35 кВ.....	60
1.8. Засоби для визначення місця однофазного замикання на землю в повітряних розподільних мережах напругою 6–35 кВ.....	70
2. Вдосконалення методу послідовного ділення мережі при пошуку пошкодження в розподільних мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 6–35 кВ.....	78
2.1. Прийняті умови та обмеження при визначенні алгоритму функціонування методу послідовного ділення мережі (МПДМ).....	78
2.2. Оптимізація програми пошуку пошкодження при міжфазних коротких замиканнях в розподільних мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 6–35 кВ.....	80
2.3. Оптимізація процесу пошуку пошкоджень при однофазних замиканнях на землю.....	92
2.4. Оптимізація програми пошуку методом послідовного ділення мережі при однофазному замиканні на землю.....	98
2.5. Оцінка ефективності МПДМ при пошуку ОЗЗ.....	101
3. Дистанційні методи визначення місця міжфазного КЗ в розподільних мережах напругою 6–35 кВ.....	103

3.1 Математичне обґрунтування дистанційного методу визначення місця міжфазного короткого замикання.....	103
3.2 Визначення розподілу навантаження окремих ТП 10/0,4 кВ вздовж магістральної лінії.....	109
3.3 Теоретичне обґрунтування та вдосконалення методу розрахунку індуктивного опору повітряної лінії напругою 6–35 кВ.....	114
3.4 Вплив параметрів перехідного процесу при виникненні пошкодження в лінії на похибку визначення місця пошкодження.....	121
3.5 Дистанційний метод визначення місця однофазного замикання на землю в розподільних мережах напругою 6–35 кВ.....	124
4. Інтегрована система визначення місця пошкодження в розподільних мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 6–35 кВ.....	130
4.1 Структурна схема керування процесом визначення місця пошкодження та її обґрунтування.....	130
4.2 Структурна схема фіксуєчого омметра.....	134
4.3 Принципова схема вхідних кіл пристрою і визначника пошкодженої фази.....	138
4.4 Схема вимірювання і фіксації струмів.....	140
4.5 Схема пристрою керування.....	143
4.6 Схема пристрою аналогового ділення.....	144
4.7 Схема блоку реактивної напруги.....	145
4.8 Пристрій індикації.....	146
Висновки.....	149
Література.....	150

Перелік умовних позначень та скорочень

АВР	– автоматичне введення резерву
АПВ	– автоматичне повторне включення
АЦП	– аналого-цифровий перетворювач
ВІС	– вимірювально-інформаційна система
ВМП	– визначення місця пошкодження
ПФ	– вибирач пошкоджених фаз
ГПП	– головна понижувальна підстанція
КЗ	– коротке замикання
КЛ	– кабельна лінія
МПДМ	– метод послідовного ділення мережі
ОВБ	– оперативно-виїзна бригада
ОЗЗ	– однофазне замикання на землю
ПАР	– параметри аварійного режиму
ПВЗ	– пристрій вибирання і зберігання
ПДВ	– пристрій довгого зберігання
ПЕМ	– підприємство електричних мереж
ПК	– пристрій керування
ПЛ	– повітряна лінія
ПМ	– повітряна мережа
ППД	– перетворювач прямої дії
РЕМ	– район електричних мереж
РМ	– розподільна мережа
СЕП	– система електропостачання
ТП	– трансформаторна підстанція
ФСІ	– формувач стробуючих імпульсів
ЦП	– центральний процесор

ВСТУП

Розподільні мережі (РМ) є складним об'єктом діагностування. Вони розподілені в просторі, мають високу ціну відмов, автономні, підлягають впливу великої кількості факторів. В процесі експлуатації РМ виникають пошкодження. Їх питома кількість є досить стійкою характеристикою, наприклад, в повітряних лініях (ПЛ) 6–10 кВ ВАТ «АК Вінницяобленерго» в середньому за 2004–2008 роки кількість пошкоджень складає 0,17 на 1 км довжини РМ в рік.

Пошкодження ліній електропередачі може призвести до порушення режиму електропостачання об'єктів народного господарства, що супроводжується недовідпуском продукції, дезорганізацією роботи транспорту, а також порушенням нормальних умов життя і побуту людей.

Визначення місця пошкодження (ВМП) в електричних мережах – це складна, тривала за часом технологічна операція. Вона є повсякденною оперативною задачею диспетчерських служб електричних мереж і систем.

На даний час значні успіхи досягнуті в розробці методів і засобів ВМП для ліній з напругою 110–750 кВ.

Здійснення комплексу робіт, забезпечує радикальне скорочення часу пошуку місця пошкодження. Розроблено методи і засоби які запобігають аварійному відключенню ліній. Наприклад, визначення нестійких пошкоджень забезпечується автоматичним повторним вмиканням (АПВ). Огляд місця пошкодження, що розвивається на включеній лінії дозволяє провести профілактичні дії і запобігти виникненню відмови. В електричних мережах з повітряними лініями електропередачі напругою 110–750 кВ широке розповсюдження отримали методи які ґрунтуються на вимірюванні часових інтервалів розповсюдження електромагнітних хвиль по лінії (імпульсні методи) і методи, що ґрунтуються на вимірюванні струмів і напруг в період к. з. і однофазного короткого замикання, тобто методи визначення місця пошкодження з параметрів аварійного режиму (ПАР).

Розподільні мережі напругою 6–35 кВ мають специфічні особливості і в порівнянні з мережами більш високої напруги, які майже виключають застосування для них методів і засобів ВМП, 110–750 кВ.

Для РМ напругою 6–35 кВ характерна складна деревоподібна конфігурація, вони часто секціонуються роз'єднувачами і вимикачами навантаження, окремі ділянки мережі виконані провідниками різної марки та перерізу, використовують різні режими роботи нейтралі (ізольована, компенсована) є інформаційно невизначеними, не чутливими до КЗ в кінці лінії, струм і напруга нульової послідовності залежить не від місця замикання, а від перехідного опору в місці замикання.

Вище наведені особливості РМ вимагають розроблення принципово нових методів і засобів ВМП. В монографії автори намагалися узагальнити отримані результати досліджень та розробки методів і засобів ВМП. В основу змісту частини монографії покладені результати досліджень авторів спрямованих на підвищення рівня надійності, безпеки і ефективності використання систем електропостачання з повітряними лініями електропередач напругою 6–35 кВ шляхом автоматизації процесу пошуку та зменшення похибки визначення місця пошкодження.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ (СЕП) ЯК ОБ'ЄКТІВ ПОШУКУ ДЕФЕКТІВ

1.1. Види та характер пошкоджень елементів розподільних мереж

Основні фактори, що визначають процедуру пошуку місця пошкодження в розподільній мережі це вид і характер пошкодження її елементів. Розподіл СЕП на елементи є умовним і залежить від глибини пошуку пошкодження. Якщо об'єкт пошуку занадто малий, то ускладнюється метод розв'язання завдання і засоби його реалізації, якщо великий – знижується точність розв'язку.

При визначенні місця пошкодження (ВМП) до окремих елементів часто відносять частини СЕП, які можна виділити комутаційною апаратурою (вимикачі, роз'єднувачі, рубильники, автомати, ділянки повітряної лінії (ПЛ), кабельні лінії (КЛ), трансформатори, розподільні пристрої, щити керування, вводи й різні струмоприймачі). У мережах постійного і змінного струму з напругою до 1000 В в якості елементів виділяють щити керування, на яких змонтована комутаційна апаратура, контакторні станції, автомати, магнітні пускачі, запобіжники.

Найненадійніші елементи систем електропостачання – повітряні лінії електропередачі. Так, у міських електромережах близько 85 % відключень доводиться на частку ПЛ, у сільських ця цифра досягає 90–95 %.

Основні причини пошкоджень ПЛ: грозові перекриття ізоляції; ожеледь та іній; навантаження від вітру; вібрація й танок проводів; загоряння дерев'яних опор; ослаблення механічної міцності деталей опор; ушкодження опор і проводів автотранспортом і механізмами.

Кабельні лінії, в основному, пошкоджуються через порушення їх механічної міцності будівельними машинами й механізмами під час земляних робіт. Через цю причину в міських електромережах відбува-

ється близько 60–70 % всіх пошкоджень кабельних ліній. Іншими причинами є старіння міжфазної і поясної ізоляції, інтенсивна корозія покриття, перевантаження кабелю, зволоження кабелю, порушення ізоляції гризунами.

Силові трансформатори пошкоджуються значно рідше, ніж лінія електропередачі. Основні причини пошкодження трансформаторів: пошкодження ізоляції обмоток через дефекти конструкції й виготовлення, вплив зовнішніх перенапруг у мережі, струмів коротких замикань; пошкодження перемикачів, викликані конструктивними й технологічними дефектами; пошкодження введів, в основному, при впливі зовнішніх перенапруг у мережі.

Відмови комутаційних апаратів відбуваються при виконанні ними різних операцій, наприклад відключення струмів, а також у стаціонарному стані. Основна причина пошкоджень комутаційних апаратів – механічні пошкодження, пов'язані з недосконалістю конструкції, порушенням технології виготовлення або правил експлуатації. Електричні ушкодження комутаційних апаратів зумовлені перекриттям ізоляції при зовнішніх і внутрішніх перенапругах, пробоем внутрішньобакової ізоляції.

До основних видів пошкоджень в розподільних мережах напругою 6–35 кВ відносять однофазні замикання на землю, КЗ між фазами, подвійні замикання на землю й обриви проводів. У мережах з напругою до 1000 В, що працюють у режимі із глухозаземленою нейтраллю, основними видами пошкоджень є міжфазні й однофазні КЗ, обриви провідників.

Для одержання кількісної характеристики пошкоджень була проаналізована пошкоджуваність у повітряних розподільних мережах напругою 10 кВ АК «Вінницяобленерго» за десять останніх років. Середня кількість пошкоджень у рік склала 565 (100 %). За причинами виникнення пошкодження розподілилися в такий спосіб:

Пробій ізоляторів.....	181 (32 %)
Обрив провідників.....	130 (23 %)
Перекриття ізоляції між фазами.....	49 (8,7 %)
Пробій і пошкодження розрядників.....	48 (8.5 %)
Обрив в'язок.....	34 (6,2 %)

Інше.....123 (21,6 %)

Кількість пошкоджень, що супроводжуються стійкими однофазними замиканнями на землю, склало 63,2 %, міжфазних КЗ – 9,7 %, подвійних замикань на землю – 5,2 %, обриву проводу – 6,2 %, інших – 15,7 %.

Аналіз пошкоджуваності кабельних ліній [75] показав, що 18,5 % пошкоджень припадає на з'єднувальні муфти, 16,5 % – на кінцеві муфти, інші 65 % – на цілі місця кабелю. При цьому на електричні пробої ізоляції в цілому місці припадає 40 % випадків, на механічні – 60 %.

Важливим показником є питома пошкоджуваність електроустановок і їхніх частин. Цей показник залежить не тільки від області застосування систем електропостачання, але й від кліматичних особливостей, забруднення середовища, рівня експлуатації й низки інших показників, характерних для цього регіону. Тому дані, наведені в різних літературних джерелах, можна розглядати лише як орієнтовні. Як приклад у табл. 1.1 наведені питома пошкоджуваність і середній час відновлення систем електропостачання напругою 6–10 кВ протягом року в Кузнецькому басейні (Росія) [82].

Аналіз таблиці 1.1 показує, що рівень пошкоджуваності систем електропостачання промислового призначення нижчий рівня пошкоджуваності систем електропостачання сільськогосподарського призначення, пошкоджуваність систем електропостачання заводу нижчий, ніж гірничодобувного підприємства, і це закономірно для будь-якого регіону, у якому експлуатується система електропостачання.

В елементах системи електропостачання виникають як стійкі, так і нестійкі пошкодження ізоляції й струмопровідних частин. Нестійкі пошкодження можуть самоусуватися, залишатися нестійкими або переходити за певних умов у стійкі. Для визначення місця пошкодження важливо знати фізику процесів, параметри як стійких, так і нестійких пошкоджень. Оскільки на частку однофазних замикань на землю припадає 60–85 % всіх пошкоджень, то важливо зупинитися на цьому виді пошкоджень.

Таблиця 1.1

Питома пошкоджуваність (чисельник) і середній час відновлення (знаменник) систем електропостачання напругою 6–10 кВ протягом року

Електроустановка, елемент, системи електропостачання	Значення показників для електроустановок				
	міського призначення	сільсько-господарського призначення	заводських	шахтних	кар'єрних
Стаціонарні ПЛ на дерев'яних опорах	0,032	0,194	0,054	0,093	0,116
	0,715	4,298	1,312	2,448	2,865
Стаціонарні ПЛ на залізобетонних і металевих опорах	0,035	0,113	0,048	0,075	0,111
	0,800	3,934	0,934	1,716	1,349
Пересувні ПЛ на дерев'яних опорах	–	–	–	–	1,450
					2,281
Стаціонарні КЛ	0,196	0,166	0,128	0,138	0,179
	3,600	5,397	4,835	3,851	6,250
Пересувні КЛ (екскаваторні кабелі)	–	–	–	–	12,041
					1,816
Підстанції комплектні одностансформаторні стаціонарної установки	0,044	0,083	0,055	0,068	0,082
	0,840	1,300	1,384	0,865	1,433
Підстанції комплектні одностансформаторні	–	–	–	0,114	0,236
				3,833	1,360
Комірки комплектні одиночної установки з масляними вимикачами (споживчі)	0,054	0,064	0,069	0,154	0,146
	1,750	1,200	1,500	2,250	1,416
Роз'єднувачі зовнішньої установки	0,060	0,070	0,061	0,083	0,106
	0,830	1,166	1,333	1,200	1,412
Електродвигуни потужністю 250–1500 кВт	–	–	0,064	0,083	0,103
			4,500	3,200	6,300

При металевих ОЗЗ на основну гармоніку струму 50 Гц накладаються високочастотний струм власної частоти контуру замикання й вищих гармонік джерел напруги. Наявність у ланцюгу замикання активного опору різко знижує вплив струму власної частоти на основну гармоніку струму (рис. 1.1).

Дугове замикання спостерігається при пробоях і перекриттях фазної ізоляції. Якщо дуга горить у великому обсязі повітря (перекриття ізолятора, обриви провідників і їх падіння на землю), то її називають відкритою. Дуги, що виникають при пробойі ізоляції безпосередньо в кабелях, обмотках трансформаторів, називають закритими. Форму кривої струму при дуговому ОЗЗ показано на рис. 1.2. У відкритих дугах при значній ємності провідників мережі щодо землі форма дуги стробаста. Таку дугу називають перекидною. Гасіння дуги відбувається, як правило, при переході через нуль струму власних коливань. Збурення дуги відбувається внаслідок пробоя проміжку провідника під час відновлення напруги на ньому до першого максимуму. Залежно від величини струму основної частоти й інших факторів може відбутися самогасіння дуги, тобто ОЗЗ «самоусувається», або тривале горіння дуги. Функціональні залежності електричних величин при ОЗЗ від параметрів електроустановки досить докладно викладені в роботах [23, 30, 33] і в інших літературних джерелах.

Точно математично описати ОЗЗ, що супроводжуються електричною дугою, складно, тому що електричний опір стійкої дуги, що горить, є нелінійною функцією струму, що протікає через неї. У цьому випадку перехідні процеси розраховують методом кусочно-лінійної апроксимації, заснованому на заміні реальної вольт-амперної характеристики дуги відрізками прямих ліній струму в дузі i_d в функції часу $i_A = f(t)$ на окремих ділянках. На жаль, цей метод не може забезпечити необхідну точність, оскільки не можна одержати для розрахунку вольт-амперну характеристику дуги із прийнятною точністю.

Для визначення екстремальних даних параметрів однофазних замикань на землю [29, 31] проводилися дослідження динаміки зміни активного опору ізоляції фаз мережі щодо землі на підстанції 110/35/6 кВ у системі АК «Вінницяобленерго» з боку напруги 6 кВ. Від підстанції відходило дев'ять ліній (шість повітряних і три кабельних), що живлять промислових і сільських споживачів. Для безперервного контролю активного опору ізоляції фаз мережі використовувалася пристрій [13], на виході якого був установлений самописний

прилад типу НЗ49, що дозволяє простежити динаміку зміни активного опору ізоляції фаз мережі щодо землі.

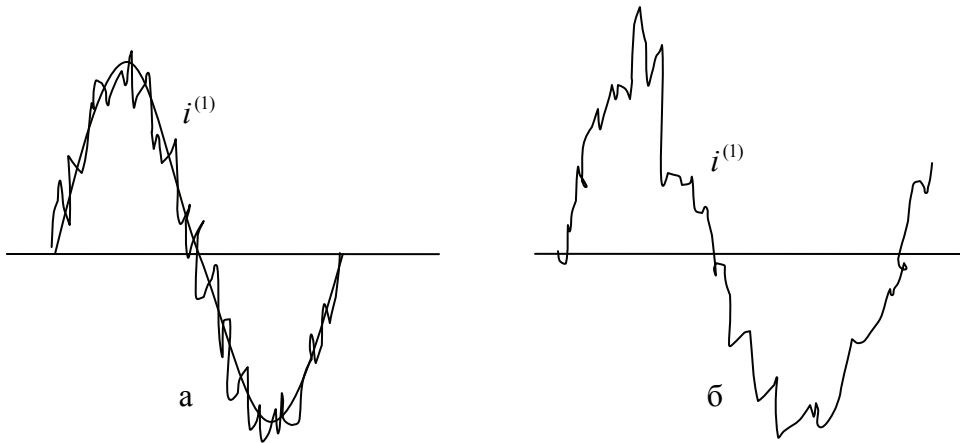


Рис. 1.1. Форма кривої струму $i^{(1)}$ без дугового металевого ОЗЗ (а) та при замиканні через активний опір (б)

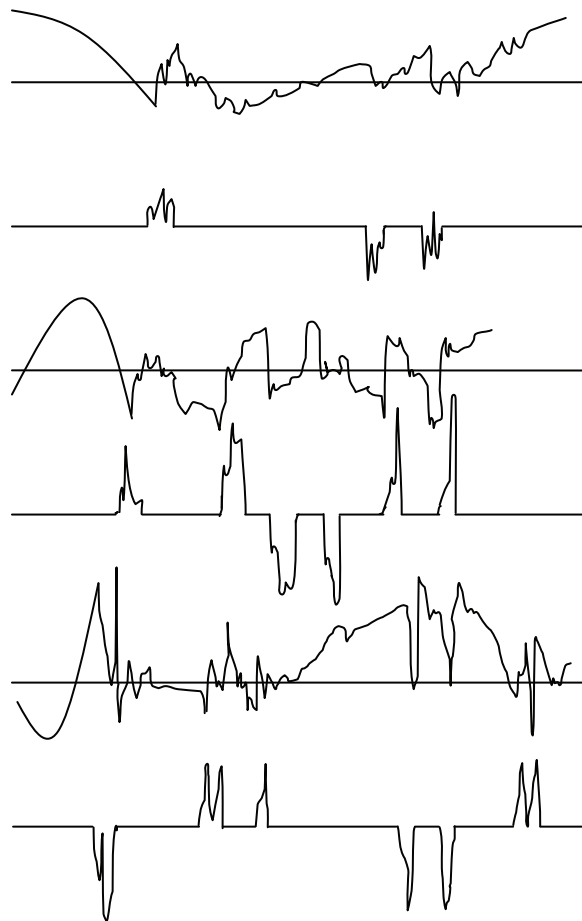


Рис. 1.2. Форми кривих струму та напруги при перекидному ОЗЗ:
а – в повітрі; б – в каналі ізоляції кабелю, що розігрівається;
в – в каналі ізоляції кабелю, що не розігрівається

Дослідження проводилися в умовах нормального експлуатаційного режиму роботи мережі протягом року. Усього було зареєстровано 53 випадки замикань на землю. В 21 випадку (39,6 %) замиканню на землю передувала повільна зміна опору ізоляції (рисунок 1.3а), що дозволяло за 1,5–2 години прогнозувати виникнення замикання. В інших 32 випадках (60,4 %) замикання носило раптовий характер. Після вмикання лінії автоматом повторного вмикання (АПВ) опір ізоляції відновлювався (рисунок 1.3б), однак починав знижуватись протягом деякого часу (від декількох годин до доби), і, в остаточному підсумку, виникало стійке замикання на землю.

Високі рівні опору ізоляції спостерігались в літній і зимовий періоди, а найбільш низький – в осінній.

Симетричне зниження опору ізоляції зумовлено, в основному, зміною рівня вологи середовища. Плавне зменшення опору ізоляції регулярно спостерігається в нічний час доби (рисунок. 1.3в), різке – при дощі. Режим роботи підключених установок при виконанні технологічних операцій майже не впливає на динаміку зміни опору ізоляції.

Стійке замикання на землю виникало при зниженні активного опору ізоляції фаз мережі щодо землі до рівня 3–5 кОм. Замикання на землю, що самоусуваються, характерні для літнього періоду й, в основному, зумовлені комутаційними перенапругами.

Вимірювання активного опору здійснювалось також у місці пошкодження. Результати вимірювань показали, що на повітряних лініях перехідний опір R_{II} перебував у межах 0,25–4 кОм, а на кабельних лініях 0,15–2,8. Аналогічні результати були отримані й іншими авторами. Так, в [69] наведений інтегральний розподіл опорів у місці замикання в мережах залізородних кар'єрів який показав, що ймовірність виникнення замикань через різні опори неоднакова, і що в 75 % R_{II} замикань не перевищувало 1 кОм. Разом з тим можливі значення $R_{II} = 6,0–8,0$ кОм. У сільських розподільних мережах захист від замикань на землю діє на сигнал. У процесі пошуку місця пошкодження струм замикання на землю може протікати протягом значного часу. У результаті просихання, спікання ґрунту біля залізобетонних опор, перегорання відводів до заземлювачів відбувається різка зміна перехід-

ного опору від кількох сотень Ом до декількох десятків кОм і створюється помилкове враження про зникнення замикання на землю.

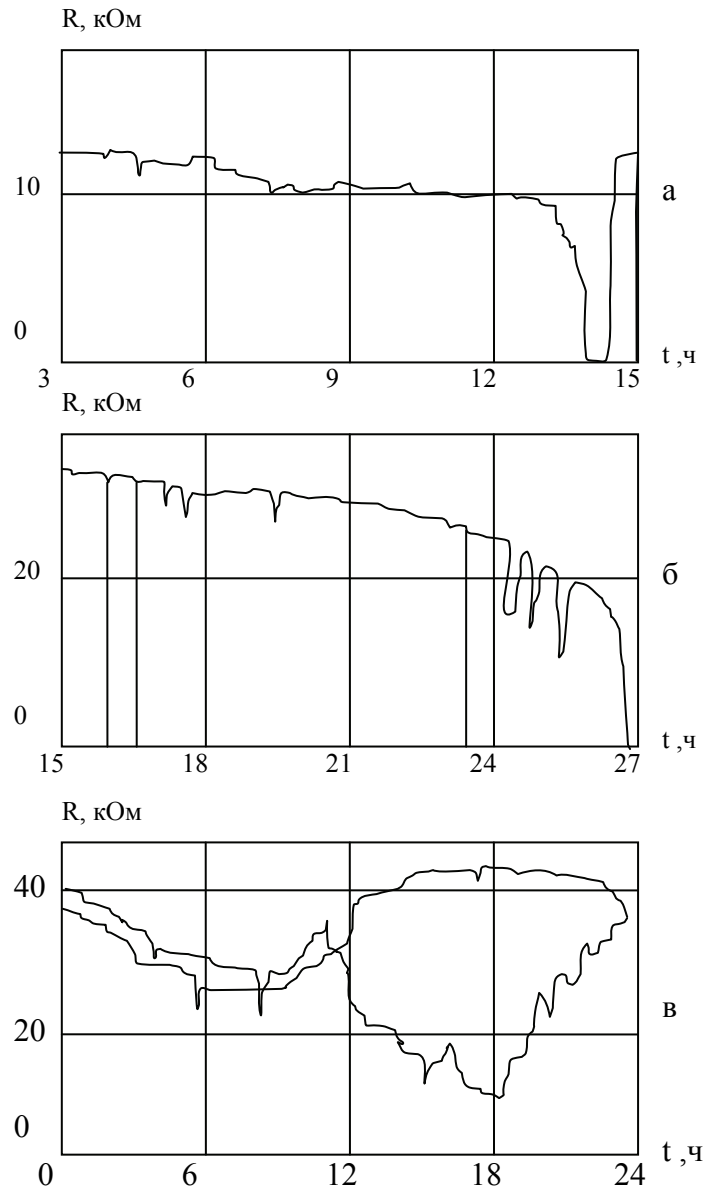


Рис. 1.3. Фрагменти динаміки зміни активного опору ізоляції фаз лінії відносно землі

Велика кількість замикань, що самоусуваються, у загальному числі ОЗЗ відзначається й іншими дослідниками [75]. У московській кабельній мережі напругою 6–10 кВ із 1000 замикань стійкими виявили-

ся тільки 79. При цьому розподіл кратності повторення короткочасних пробоїв стійкого пошкодження для 106 кабельних ліній склало:

Кратність повторення короткочасних пробоїв	Кількість випадків, %
1	55
2	32
3–6	13

Розподіл інтервалів часу від першого короткочасного пробою, що відноситься до даного місця пошкодження, для цих же випадків такий:

Інтервал часу	Кількість випадків, %
10–60 хв	25
1–24 год	35
1–10 діб	23
Більше 10 діб	17

Наведені дані ще раз підтверджують поступовий розвиток пошкоджень як у повітряних, так і в кабельних мережах, а також можливість своєчасного виявлення дефекту й усунення за рахунок профілактичних заходів.

При замиканнях між фазами перехідні опори часто визначаються тільки опорами дуг. Вольт-амперна характеристика дуги нелінійна. Протягом кожного напівперіоду опір дуги значно змінюється, при цьому форма струму в ній звичайно близька до синусоїдального, тому що струм, в основному, визначається опорами елементів системи. Напряга на дузі, на відміну від струму, сильно спотворюється (рис. 1.4а).

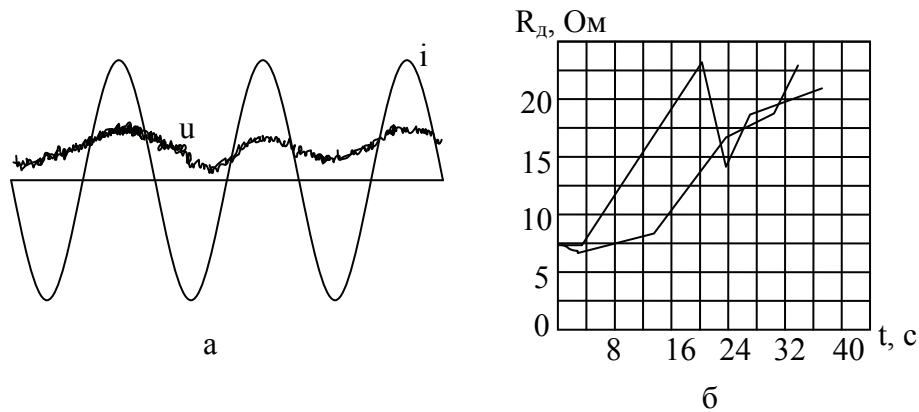


Рис. 1.4. Форма кривої струму та напруги в дузі (а); залежність опору дуги від часу (б)

При розгляді методів ВМП часто використовують поняття про еквівалентний опір дуги, при цьому потрібно мати на увазі, що дуга є потужним «генератором» вищих гармонік. Експериментальні дослідження відкритих дуг, що проводилися в багатьох країнах, показали, що при діючих значеннях струму I_d в сотні амперів і більше, опір дуги, що є практично активним, може в загальному випадку визначатися виразу

$$R_d = U'_m l_d / I_d^k, \quad (1.1)$$

де U'_m – градієнт напруги на дузі, В/м; l_d – її довжина, м.

Градієнт напруги на дузі як такий, що мало залежить від струму, при більших його значеннях приймається постійним і рівним 1400–1500 В/м, а показник степеня $k=1$. Тоді R_d Ом, розраховується за амплітудним значенням:

$$R_d = U'_m l_d / I_m = U'_m l_d / 1,4 I_d \approx 1050 l_d / I_d. \quad (1.2)$$

Дуга має найменший опір у перші періоди часу виникнення ушкодження, коли струм I_d має максимальне значення, а довжина l_d – мінімальне. Далі, під впливом вітру, конвекції повітря й електродинамічних зусиль дуга подовжується і її опір починає швидко зростати (рис. 1.4 б).

Наявність перехідних опорів R_{π} як при міжфазних КЗ, так і при однофазних замиканнях на землю може істотно впливати на точність методів ОМП.

Мережі постійного струму широко застосовують для живлення електроприймачів у різних галузях народного господарства. На електричних станціях і підстанціях їх використовують як оперативні ланцюги для живлення засобів релейного захисту і автоматики, апаратури дистанційного керування.

Найненадійніший елемент розподільної мережі постійного струму – ізоляція полюсів мережі щодо землі. У процесі експлуатації вона піддається механічним, електричним і атмосферним впливам. На ізоляцію комутаційної апаратури впливають тверді, рідкі й газоподібні частки різних речовин, що перебувають у повітрі. Вони осідають на поверхню ізоляції й утворюють при зволоженні атмосферною вологою провідний шар, що істотно знижує електричну міцність ізоляції.

У розподільних мережах постійного струму часто виникають перенапруги, які можуть досягати 4–8-кратного значення від номінальної напруги, а тривалість імпульсу перенапруги може становити кілька секунд, що приводить до пробоя ізоляції.

Дослідження динаміки зміни опору ізоляції в оперативних ланцюгах постійного струму підстанції «Вінницька 330» протягом одного року показало, що більшість пошкоджень (67 %) носить нестійкий характер і обумовлено короткочасними перенапругами. Стійкі пошкодження викликані механічним впливом і зволоженням ізоляції.

1.2. Параметри заступної схеми елементів систем електропостачання

У схемах заміщення систем електропостачання розрізняють поздовжні й поперечні елементи. До першого відносять елементи мережі, по яких протікає струм навантаження, до других – елементи, включені на повну напругу.

Повздовжнім і поперечним елементам схем заміщення мережі відповідають повздовжні й поперечні параметри, які відбивають властивості мережі й фізичну сутність процесів, що відбуваються в ній.

Лінії електропередачі характеризуються такими параметрами: активним опором $r_{л}$, Ом; реактивним опором $x_{л}$, Ом; активною провідністю $g_{л}$, См; реактивною провідністю $b_{л}$, См.

Повний опір лінії

$$z_{л} = r_{л} + jx_{л} = z_{л} e^{j\phi_{л}}, \quad (1.3)$$

$$\text{де } z_{л} = \sqrt{r_{л}^2 + x_{л}^2}, \quad \phi_{л} = \text{arctg}(x_{л} / r_{л}).$$

Повна провідність лінії

$$y_{л} = g_{л} + jb_{л} = y_{л} e^{j\phi_{л}}, \quad (1.4)$$

$$\text{де } y_{л} = \sqrt{g_{л}^2 + b_{л}^2}; \quad \phi_{л} = \text{arctg}(b_{л} / g_{л}).$$

У загальному випадку лінії електропередачі представляють симетричними П- і Т-подібними заступними схемами (рисунок 1.5). Вважають, що опір і провідності є зосередженими параметрами, які визначаються з виразів

$$z_{л} = z_{вд} l, \quad y_{л} = y_{вд} l; \quad (1.5)$$

де $z_{вд} = r_{вд} + jx_{вд}$; $y_{вд} = g_{вд} + jb_{вд}$; l – довжина лінії, км; $r_{вд}, x_{вд}, b_{вд}, g_{вд}$ – відповідно питомі: активний, реактивний опори См/км, Ом/км опори й активна, реактивна провідності.

Вираз (1.5) справедливий для порівняно коротких ліній, якими є розподільні мережі. Параметри повітряних ліній довжиною більше 300 км і кабельних ліній більше 50 км необхідно визначати з інших формул [65], як ліній з розподіленими параметрами.

Активний опір є опором змінному струму, що протікає по провіднику. Внаслідок нерівномірного розподілу змінного струму по перетину провідника його активний опір змінному струму більший, ніж постійному.

Активний опір лінії довжиною l , км, визначається з виразу

$$r_{л} = r_{вд} l = \rho \cdot l / F, \quad (1.6)$$

де F – переріз провідника, мм²; ρ – розрахунковий питомий опір матеріалу провідника, Ом·мм²/км.

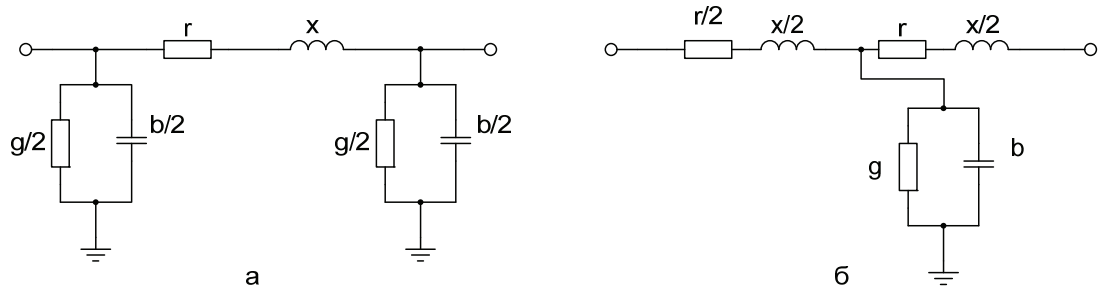


Рис. 1.5. П-подібна (а) та Т-подібна (б) заступні схеми лінії електропередачі

В практичних розрахунках значення $r_{л}$ визначається не з формули (1.6), а з відповідних таблиць, де вони зазначені для розрахункової температури +20 °С.

При температурі θ , що відрізняється від розрахункової, фактичний опір

$$r_{\phi} = r_{л} (1 + 0,004 (\theta - 20)). \quad (1.7)$$

В зв'язку з тим, що при розрахунку мереж облік температури складний, активні опори проводів і кабелів звичайно відносять до +20 °С. Активний опір змінному струму мереж зі сталевих проводів значно більший, ніж постійному, і більший активного опору ліній електропередачі того ж перерізу з міді або алюмінію. Крім того, активний опір сталевих проводів залежить від струму, що протікає по них, а також від хімічного складу сталі й конструкції провідника, тому його визначають із спеціальних таблиць.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fault location on distribution systems: an update on EPRI and DOE research. Tom Short. EPRI IEEE Distribution Subcommittee presentation, Orlando, FL, Jan. 10, 2007.
2. Hess M. N. Electromagnetic and electrostatic transmission line parameters by digital computer // IEEE Trans. – 1983. – Vol. PAS-82. – P. 282–291.
3. High impedance fault detection technology // Report of PSRC working Group D15. – March 1, 1996.
4. А. с. 1211673 СССР, МКИ G 01 R 31/08. Устройство для определения места замыкания на землю в электрических сетях / Р. Ш. Сагутдинов и др. (СССР). – № 9730091/24-21 ; заявл. 28.04.84 ; опубл. 15.02.86, Бюл. № 6.
5. А. с. 1255968 СССР, МКИ G 01 R 31/08. Способ определения места короткого замыкания на землю на линии электропередачи / И. А. Мелюхов (СССР). – № 3822595/24-91 ; заявл. 10.12.84 ; опубл. 07.09.86, Бюл. № 33.
6. А. с. 1317056 СССР, H02h 3/16. Устройство для сигнализации замыканий на землю в двухпроводных сетях постоянного тока.
7. А. с. 1370630 СССР, МКИ G 01 R 31/08. Устройство для определения поврежденного участка электросети при однофазном замыкании на землю / В. Л. Вайнштейн, В. Н. Мохов (СССР). – № 4113695/24-21 ; заявл. 03.06.86 ; опубл. 30.01.88, Бюл. № 4.
8. А. с. 213179 СССР, G01r 31/08. Способ определения места замыкания на землю на воздушных линиях электропередачи в распределительных сетях.
9. А. с. 476524 СССР, G01r 31/08. Способ определения места замыкания жилы на металлическую оболочку многожильного силового кабеля.

10. А. с. 828127 СССР, G01r 31/08. Способ определения расстояния до места замыкания фазы на землю в электрической сети с изолированной нейтралью.

11. А. с. 828127 СССР, МКИ G 01 R 31/08. Способ определения расстояния до места замыкания фазы на землю в электрической сети с изолированной нейтралью / Л. П. Савков, В. И. Сукманов, А. И. Селевахин, И. Г. Беляков, А. В. Луковников, А. П. Кузнецов (СССР). № 2591803/24-21 ; заявл. 22.03.78 ; опубл. 07.05.81, Бюл. № 17.

12. А. с. 853570 СССР, МКИ G 01 R 31/08. Устройство для определения места замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью / Н. В. Даки (СССР). – № 2809160/24-21 ; заявл. 16.08.79 ; опубл. 07.08.81, Бюл. № 29.

13. А. с. 877686 СССР, H02h 3/16. Устройство для сетей переменного тока с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю.

14. А. с. 911377 СССР, МКИ G 01 R 31/08. Способ определения расстояния до места повреждения при коротких замыканиях / И. С. Дулуб, Ю. Л. Кошкин (СССР). – № 2846344/18-21 ; заявл. 04.12.79 ; опубл. 07.03.82, Бюл. № 9.

15. Айзенфельд А. И. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями / Айзенфельд А. Д., Шалыт Г. М. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.

16. Анализ нормальных и аварийных режимов электроэнергетических систем. – К. : Наукова думка 1982. – 102 с.

17. Бернас С. Математические модели элементов электроэнергетических систем ; пер. с польск. / Бернас С., Цек З. – М. : Энргоатомиздат, 1982. – 312 с.

18. Берхин В. И. Определение мест повреждения при междуфазных к. з. в воздушных распределительных сетях 6–10 кВ / Бер-

хин В. И. // Эксплуатация и ремонт энергосистем, 1982. – вып. 5. – С. 29–31.

19. Борухман В. А. Устройства для определения мест повреждения на воздушных линиях электропередачи 6–750 кВ / Борухман В. А., Кудрявцев А. А., Кузнецов А. П. – М. : Энергия, 1980. – 104 с.

20. Букович Н. В. Расчет токов короткого замыкания электроэнергетических систем / Букович Н. В. ; под ред. Денисенко Г. И. – Львов : Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1988. – 248 с.

21. Булатников М. В. Определение первичных продольных параметров воздушных и подземных линий электропередачи на основе расчета электромагнитного поля / Булатников М. В., Кадомская К. П., Кандаков С. А., Лавров Ю. А. // Электричество. – 2006. – № 5. – С. 17–24.

22. Буслова Н. В. Электрические системы и сети / Буслова Н. В., Винославский В. Н., Денисенко Г. И., Перхач В. С. ; под ред. Г. И. Денисенко. – К. : Вища школа : Головное издательство, 1986. – 584 с.

23. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. / Г. В. Буткевич – М. : Энергия, 1971 —152 с.

24. Вишняков Е. М. Расчет межпроводной индуктивности и емкости симметричных прямых пар методом Конформных отображений и конечных элементов [Электронный ресурс] / Вишняков Е. М., Хвостов Д. В. // Режим доступа до статті:
<http://elcut.ru/articles/hvostov/cable.pdf>

25. Гейдерман Ж. П. О влиянии нагрузки на замер расстояния до места междуфазного к. з. в распределительных сетях 6–10 кВ / Гейдерман Ж. П., Стасенко Р. Ф., Кузнецов А. П. // Электрические станции. – 1978. – № 4. – С. 58–59.

26. Голубев М. Л. Расчет токов к. з. в электросетях 0,4–35 кВ / Голубев М. Л. ; 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергия, 1980. – 88 с.

27. Гриб О. Г. Одностороннее определение места повреждения воздушных линий по параметрам аварийного режима в сетях с эффективно-заземленной нейтралью. / Гриб О. Г., Сендерович Г. А., Калюжный Д. Н. // Электрические станции. – 2006. – № 2. – С. 42–46.

28. Дмитриев К. С. Оценка влияния апериодической составляющей на параметры первой гармоники принужденной составляющей тока КЗ, определяемые разложением в ряд Фурье / Дмитриев К. С. // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 9–14.

29. Дулуб И. С. Измерение расстояния до места повреждения в распределительных сетях / Дулуб И. С., Салевахин А. И. // Энергетик. – 1987. – № 12. – С. 33–34.

30. Дударев Л. В. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях / Дударев Л. В., Запорожченко С. И., Лукьянцев Н. М. // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.

31. Жежеленко И. В. Методы вероятностного моделирования в расчетах электрических нагрузок потребителей / Саенко Ю. Л., Степанов В. П. / – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.

32. Жучков В. В. Определение места повреждения в линиях измерением входного сопротивления / Жучков В. В. // Сборник научных трудов ССХИ. – Саратов : Изд-во Саратовского Университета, 1979. – вып. 18.

33. Зорин В. В. Надежность систем электроснабжения / Зорин В. В., Тисленко В. В., Клеппель Ф., Адлер Г. – К. : Вища шк., головное издательство, 1984. – 192 с.

34. Зуль Н. М. Учет влияния нагрузки на измерение индуктивного сопротивления петли короткого замыкания / Зуль Н. М. // Эксплуатация и ремонт энергосистем, 1982. – вып. 5. – С. 43–45.

35. Идельчик В. И. Электрические системы и сети : учебник для вузов / Идельчик В. И. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

36. Инструкция. СОУ-Н МПЕ40.1.20.563:2004 «Ликвидации аварий и технологических нарушений режима на энергопредприятиях и в энергообъединениях», 2005 г.

37. К. П. Крюков. Конструкция и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев/ – Л. : Энергия, 1970. – 392 с.

38. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей : справочная книга / Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. ; 3-е изд., перераб. и доп.. – Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.

39. Кутин В. М. Внедрение комплекса средств диагностики распределительных сетей 10–35 кВ с изолированной нейтралью [Отчет о НИР (заключ.)] / Винниц, политехи, ин-т. № 2121; ГР 01860124705; Инв. № 02910028478. – Винница, 1990. – 42 с.

40. Кутин В. М. Диагностика повреждения изоляции распределительных сетей выше 1000 В с изолированной нейтралью / Кутин В. М., Кобылянский А. В. // Промышленная энергетика. – 1984. – № 7. – С. 11–14.

41. Кутин В. М. Диагностирование электрооборудования электрических систем : учеб. пособие / Кутин В. М., Брейтбурд В. И. – К. : УМК ВО, 1991. – 104 с.

42. Кутин В. М. Поиск повреждений в распределительных электрических сетях / Кутин В. М., Пискляров П. К. – К. : Техніка, 1994. – 138 с.

43. Кутін В. М. Автоматизація процесу пошуку пошкоджень в повітряних мережах напругою 6–35 кВ / Кутін В. М., Луцяк В. В. // Автоматика 2006 ; XIII Міжнародна конференція з автоматичного управління., 25–28 вересня 2006 р. – Вінниця, 2006. – С. 119.

44. Кутін В. М. Дистанційний метод визначення місця міжфазного короткого замикання в розподільній мережі 6–35 кВ з повітряними лініями електропередачі / Кутін В. М. Луцяк В. В. // Вісник КДПУ.– 2006. – № 3 (38), Ч. 2. – С. 75–76.

45. Кутін В. М. Діагностування об'єктів, класи станів яких є розмиті множини / Кутін В. М., Луцяк В. В., Матвієнко С. В. // Вісник Криворізького технічного університету ; збірник наук. праць. – 2005. – Вип. 8 – С. 120–123.

46. Кутін В. М. Інформаційно-вимірювальна система визначення місць пошкодження в розподільних мережах змінного струму напругою 6–35 кВ / Кутін В. М., Вашковський В. В. // Вісник ВПІ, 2000. – № 5. – С. 48–55.

47. Кутін В. М. Керування технічним станом електротехнічних комплексів в процесі їх експлуатації / Кутін В. М., Матвієнко С. В., Луцяк В. В. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ; збірник наук. праць. – 2005.– № 3(32). – С. 152–155.

48. Кутін В. М. Комбинированная система диагностирования систем электроснабжения (СЭС) промышленности и сельского хозяйства / Матвієнко С. В., Луцяк В. В. // Наука і освіта 2005 ; VIII міжнародна науково-практична конференція., 7–21 лютого 2005 р. – Дніпропетровськ, 2005. – С. 38–40.

49. Кутін В. М. Комбінована система визначення місця пошкодження в повітряних розподільних мережах напругою 6–35 кВ / Кутін В. М., Луцяк В. В. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск : Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. – К., 2008. – С. 57–60.

50. Кутін В. М. Комбінована система пошуку пошкоджень в розподільних повітряних мережах / Кутін В. М., Луцяк В. В., Матвієнко С. В. – // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ; збірник наук. праць. – 2005.– № 3(32). – С. 169–171.

51. Кутін В. М. Підвищення якості діагностичних процедур складних систем автономного керування / Кутін В. М., Луцяк В. В., Матвієнко С. В. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського ; збірник наук. праць. – 2007. – Вип. 3 (44). – С. 137–138.

52. Кухарчук В. В. Метрологія та вимірювальна техніка : навчальний посібник / Кухарчук В. В., Кучерук В. Ю., Долгополов В. П., Грумінська Л. В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с.

53. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М : Энергия, 1971 – 152 с.

54. Луцяк В. В. Дистанційний метод визначення місця міжфазного короткого замикання в розподільній мережі 6–35 кВ з повітряними лініями електропередачі / Луцяк В. В., Кутін В. М., Матвієнко С. В // Вісник Криворізького технічного університету ; збірник наук. праць. –2006. – С. 112–115.

55. Луцяк В. В. Дослідження параметрів аварійного режиму при визначенні місця пошкодження в РМ дистанційними методами / Луцяк В. В. // Проблеми і перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств ; науково-технічний семінар. : тези доп. – Луцьк, 2007. – С. 22–25.

56. Луцяк В. В. Точність вимірювання відстані до місця пошкодження дистанційним методом в розподільних мережах / Луцяк В. В., Кутін В. М. – [збірник наук. праць]. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського ; збірник наук. праць. – 2007. – Вип. 3. – С. 97-99.

57. Макаров В. М. Первичные параметры линий электропередачи : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.07 / Макаров В. М. – 1976. – 22 с.

58. Малый А. С. Определение мест повреждений электропередачи по ПАР / Малый А. С. ; под ред. Шалыта Г. М. – М. : Энергия, 1972.

59. Марактанов В. А. Индуктивности линий, состоящих из параллельных проводов : уч. пособие / Марактанов В. А., Янко-Триницкий А. А. – Свердловск : Издание УПИ, 1962. – 20 с.

60. Махарадзе Г. Т. Исследование сопротивлений воздушных линий электропередачи токам различных последовательностей : автореф. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи» / Махарадзе Г. Т. – Баку, 1986. – 17 с.
61. Методика определения электрических нагрузок городских потребителей / АКХ им. К. Д. Памфилова. – М. : Стройиздат, 1981. – 76 с.
62. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : нав. посібник / Володарський Є. Т., Кухарчук В. В., Поджаренко В. О., Середнюк Г. Б. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 219 с.
63. Назаров В. В. Передвижная высоковольтная лаборатория // Электрические станции. – 1986. – М 5. – С. 70–71.
64. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. / Л. Р. Нейман, К С. Декирчян. – М., – Л. : Энергия, 1966. – 622 с.
65. Овсянников А. А. Автоматизация поиска замыканий на землю в оперативных цепях постоянного тока / А. А. Овсянников, В. А. Райбиевич, В. В. Шлык // Электрические станции. – 1982. – № 2. – С. 61–63.
66. Орнацкий П. П. Автоматические измерения и приборы / Орнацкий П. П. – К. : Вища школа, 1986. – 504 с.
67. Производство и распределение электрической энергии : электротехнический справочник в 3 т., в 2 кн. / Под общ. ред. проф. МЭИ: И. Н. Орлова и др. ; 7-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. , Кн. 1. – 1988. – 880 с.
68. Раздельное преобразование комплексных сопротивлений / Добров Е. Е., Татаринцев И. Н., Черноус В. М., Штамбергер Г. А. – Львов : Вища школа, 1985. – 136 с.

69. Самойлович И. С. К оценке переходных сопротивлений при однофазных замыканиях в сети 6–10 кВ. // Пробл. техн. электродинамики. – 1972. – Вып. 37. – С. 55–60.
70. Сирота А. М. Переходные процессы в компенсированной сети при замыканиях на землю // Вопр. устойчивости и автоматики энерг. систем. – 1959. – Вып. 16. – С. 56–76.
71. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова ; 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.
72. Стасенко Р. Ф. Автоматизация сельских электрических сетей / Стасенко Р. Ф., Фещенко П. П. – К. : Техніка, 1982. – 128 с.
73. Файбисович В. А. Определение параметров электрических систем: Новые методы экспериментального определения / Файбисович В. А. – М. : Энергоиздат, 1982. – 120 с.
74. Шабад М. А. Автоматика электрических сетей 6–35 кВ в сельской местности / Шабад М. А. – Л. : Энергия, 1979. – 104 с.
75. Шаин А. Д. Селективный контроль изоляции в сети оперативного постоянного тока / А. Д. Шаин, Б. Ф. Менакер, И. С. Стеркин // Пром. энергетика, – 1975. – № 1. – С. 78–90.
76. Шалыт Г. М. Определение мест повреждений в электрических сетях / Шалыт Г. М. – М. : Энергоатомиздат, 1982. — 312 с.
77. Шалыт Г. М. Определение мест повреждений линий электропередачи по параметрам аварийного режима / Г. М. Шалыта, А. И. Айзенфельд, А. С. Малый ; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1983, – 207 с.
78. Шалыт Г. М. Теория и применение дистанционного определения мест повреждений линий электропередачи : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.14.06 / Шалыт Г. М. – М., 1976. – 34 с.

79. Швецкий Б. И. Электронные цифровые приборы / Швецкий Б. И. – К. : Техніка, 1981. – 247 с.
80. Шнеерсон Э. М. Дистанционные защиты / Шнеерсон Э. М. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.
81. Шуин В. А. Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных линиях // Электричество. – 1983. – № 12. – С. 4.
82. Шуцкий В. И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В. И. Шуцкий, В. О. Жидков, Ю. Н. Ильин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
83. Ховард Р. А. Динамическое программирование и марковские процессы. – М. : Сов. радио, 1964. – 220 с.

Наукове видання

**Кутін Василь Михайлович
Луцяк Віталій Васильович**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПОШУКУ ПОШКОДЖЕНЬ
В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ З ПОВІТРЯНИМИ
ЛІНІЯМИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАПРУГОЮ 6-35 КВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Луцяком

Підписано до друку 20.12.2011 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 9,24
Наклад 100 прим. Зам № 2011-179

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

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.