

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, Р. О. Слободян

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ОПЕРАТОРІВ
СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 621.316.7
Б 91

Рекомендовано до друку Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 30.09.2025 р.)

Рецензенти:

В. В. Каплун, доктор технічних наук, професор

В. В. Кулик, доктор технічних наук, доцент

Бурбело, М. Й.

Б91 Підвищення надійності та ефективності електричних мереж операторів систем розподілу: Монографія / М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, Р. О. Слободян. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 116 с.

ISBN 978-966-641-979-1

В монографії висвітлені теоретичні засади і практичні аспекти реконфігурації електричних мереж, вибору місць розміщення реклоузерів та пристроїв *Soft Open Point (SOP)* в мережах 10 кВ операторів систем розподілу. Монографія розрахована на широке коло інженерно-технічних працівників. Книга може бути корисною студентам та аспірантам електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 621.316.7

ISBN 978-966-641-979-1 (друк)

ISBN 978-617-8163-67-9 (PDF)

© М. Бурбело, Ю. Лобода, Р. Слободян, 2025

© ВНТУ, 2025

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ОПЕРАТОРІВ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ	10
1.1 Показники надійності та ефективності електричних мереж	10
1.2 Підвищення надійності електричних мереж операторів систем розподілу	14
1.3 Реконфігурація електричних мереж як один із заходів підвищення надійності та ефективності електричних мереж.....	20
1.4 Аналіз можливості застосування пристроїв Soft Open Point.....	24
1.5 Висновки та основні задачі дослідження	25
РОЗДІЛ 2. МАТРИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	27
2.1 Визначення показників надійності електропостачання споживачів за параметрами електричних мереж	27
2.2 Матричний метод визначення показників надійності розгалужених розподільних електричних мереж.....	31
2.3 Алгоритм визначення місць встановлення реклоузерів	37
2.4 Приклади визначення місць встановлення реклоузерів	41
2.5 Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3. РЕКОНФІГУРАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	50
3.1 Основи реконфігурації окремого фідера електричної мережі	50
3.2 Алгоритм реконфігурації окремого фідера електричної мережі	53
3.3 Алгоритм реконфігурації декількох фідерів електричної мережі	61
3.4 Застосування технологій microgrid	64
3.5 Висновки до розділу 3	66

РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ <i>SOFT OPEN POINT</i> ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	68
4.1 Застосування Soft Open Point для оптимізації втрат електроенергії в розподільних електричних мережах	68
4.2 Стратегії керування Soft Open Point за активною та реактивною потужністю в розподільних електричних мережах	74
4.3 Керування Soft Open Point за реактивною потужністю з метою оптимізації втрат потужності в розподільних електричних мережах.....	78
4.4 Моделювання Soft Open Point з керуванням за реактивною потужністю за випадкового характеру навантаження.....	85
4.5 Моделювання Soft Open Point з керуванням за активною та реактивною потужністю за випадкового характеру навантаження	92
4.6 Висновки до розділу 4	101
ВИСНОВКИ.....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АВР	—	автоматичне ввімкнення резерву
АПВ	—	автоматичне повторне ввімкнення
КЗ	—	коротке замикання
КЛ	—	кабельна лінія електропередавання
ЛЕП	—	лінія електропередавання
ОСР	—	оператор системи розподілу
ПЛ	—	повітряна лінія електропередавання
ПС	—	підстанція
ПТЕ	—	правила технічної експлуатації
ПУЕ	—	правила улаштування електроустановок
ТП	—	трансформаторна підстанція
<i>ENS</i>	—	розрахунковий обсяг недовідпущеної електроенергії (<i>Energy not Supplied</i>)
<i>MAIFI</i>	—	індекс середньої частоти коротких перерв (<i>Momentary Average Interruption Frequency Index</i>)
<i>PBR</i>	—	система винагород/штрафів (<i>performance-based rate</i>)
<i>SAIDI</i>	—	індекс середньої тривалості довгих перерв (<i>System Average Interruption Duration Index</i>)
<i>SAIFI</i>	—	індекс середньої частоти довгих перерв (<i>System Average Interruption Frequency Index</i>)
<i>SOP</i>	—	м'які відкриті точки (<i>Soft Open Point</i>)

ВСТУП

Проблема підвищення надійності електричних мереж операторів систем розподілу потребує термінового вирішення. Найбільший внесок в індекси *SAIDI* і *SAIFI* вносить складова надійності в розподільних мережах 6-20 кВ. Причина знаходиться у вкрай низькому рівні автоматизації таких електромереж. Очевидно, що ключем до вирішення проблеми є якнайшвидша їх автоматизація. Але на даний час в Україні відсутні ефективні алгоритми і технічні рішення у цьому напрямку, а копіювання закордонних методів не дає належного ефекту через відмінності у принципах побудови розподільних мереж. Серед головних особливостей розподільних мереж, які негативно впливають на індекси *SAIDI* і *SAIFI*, є надто велика довжина фідерів, яка іноді перевищує 50 км, а також наявність величезної кількості лінійних роз'єднувачів, якими можна оперувати лише при відсутності навантаження, і які самі є однією з причин низької надійності мереж 6-20 кВ.

Ці та інші фактори призводять до того, що фактичний рівень *SAIDI* на багатьох ділянках розподільних мереж сягає 4000 хвилин на рік, а на деяких фідерах 6-10 кВ перевищує 10 000 хвилин (за даними Держенергонагляду).

Однією лише заміною лінійних роз'єднувачів на сучасні реклоузери, секціоналайзери та інші сучасні комутаційні пристрої досягти бажаних результатів неможливо. Необхідно розробити алгоритми, які б дозволяли визначати місця встановлення таких пристроїв із врахуванням основних параметрів мережі, і забезпечили при цьому досягнення бажаних параметрів *SAIDI*, *SAIFI* при мінімальних капіталовкладеннях. Такий підхід сприятиме якнайшвидшому практичному впровадженню операторами систем розподілу, оскільки дозволить швидко і з мінімальними витратами коштів досягати ключових показників ефективності, встановлених Регулятором (НКРЕКП) для операторів систем розподілу на регуляторні періоди згідно чинних в Україні механізмів *RAB*-регулювання.

З розвитком сучасних технологій та впровадженням концепції «розумна мережа» (*Smart Grid*), яка базується на використанні цифрових технологій для керування та моніторингу електричних мереж, забезпечення надійності електропостачання стає ще більш

актуальним, оскільки впливає на їх безперебійну роботу, безпеку споживачів та ефективність електропостачання [1-10]. В сучасних умовах, коли збільшується кількість відновлюваних джерел енергії, зростає популярність використання електромобілів та розширюється використання розумних пристроїв у побуті та промисловості, вимоги до надійності електропостачання та ефективності електричних мереж операторів систем розподілу стають ще більш суттєвими [11-20].

Таким чином, питання забезпечення надійності електропостачання споживачів та ефективності електричних мереж є надзвичайно актуальними і мають значний вплив на безперебійну та надійну роботу споживачів.

На основі аналізу літературних джерел проаналізовано методи оцінювання надійності розподільних мереж. Недоліком методів є складність їх практичного застосування для розгалужених розподільних мереж.

Розрахунок надійності розгалужених ПЛ на даний час немає достатньо ефективного математичного забезпечення. Пропонується матричний метод аналізу надійності, в основу якого покладено використання матриці шляхів. Метод дозволяє врахувати приналежність окремих ділянок ПЛ до магістралі та відгалужень з урахуванням їх диференційованого впливу на показники надійності.

Запропоновано алгоритм вибору місця розташування реклоузерів, який базується на матричному методі розрахунку. В деяких операторів системи розподілу наявні закодовані конфігурації своїх мереж, які вони використовують для розрахунку втрат електроенергії, даний алгоритм на основі цієї інформації дає змогу автоматизувати та значно пришвидшити процес розрахунку.

Проблема вибору оптимальної конфігурації – це одна із багатокритеріальних задач оптимізації, де рішення вибирається після оцінювання низки критеріїв (наприклад, втрат активної потужності (ΔP) або електроенергії (ΔW), індексів надійності (*SAIFI*, *SAIDI*, *ENS*), з урахуванням обмежень: не перевищення максимальних струмів навантажень окремих ліній електропередачі, втрат напруги у вузлах навантаження тощо).

Складність реконфігурації полягає також в несумісності різних критеріїв. Для створення глобальної функції всі критерії повинні бути перетворені в одну і ту ж одиницю вимірювання. Найчастіше

використовується метод перетворення їх у витрати, що, як правило, є складною і часто неточною операцією.

Для скорочення часу відновлення повністю або частково автоматизованих розподільних мереж, що обладнані перемикачами з дистанційним керуванням, реконфігурація може бути виконана набагато швидше, оскільки їх керування здійснюють з диспетчерського центру. Таким чином, бажано встановити автоматичні перемикачі (реклоузери) замість ручних, щоб уможливити швидке відновлення електропостачання.

Розглянуто алгоритм реконфігурації окремого фідера розподільної електричної мережі за критерієм мінімуму втрат активної потужності. Для автоматичного визначення структури дерева фідера використано матрицю контурів, за якою визначається матриця базисних перетинів, яка однозначно характеризує структуру розімкнутого фідера.

Алгоритм базується на аналізі чутливості зменшення втрат при зміні конфігурації мережі з використанням аналізу параметрів усталеного режиму мережі. Запропонований підхід поширено на випадок оптимізації конфігурації декількох фідерів розподільної електричної мережі за критеріями надійності та мінімуму втрат електроенергії з використанням обмежень щодо максимальних значень втрат напруги у вузлах навантаження і струмів навантаження ліній електропередачі.

Проаналізовано застосування *Soft Open Point (SOP)* в мережах 10 кВ операторів систем розподілу для зменшення втрат електроенергії. Розрахунок на реальних даних Ф-33 та Ф-45 Хмельницького РЕМ показав, що застосування *SOP* приводить до зменшення втрат електроенергії в мережах 10 кВ на 14,2 %, термін окупності встановлення пристрою становить приблизно 8 років, а при збільшенні навантаження в 3 рази очікуване значення терміну окупності – 2,8 роки.

Запропоновано принципи керування *SOP*, в основу яких покладено порівняння напруг наприкінці фідерів з синхронізацією та без синхронізації нульового початкового кута напруги на початку фідерів, а також використання різниці напруг наприкінці фідерів та на їх початку. Останній алгоритм є найбільш точним у випадку однорідних мереж. Подальший напрямок дослідження – оцінювання похибок та поширення останнього алгоритму на неоднорідні мережі.

Розглянуто метод керування джерелом реактивної потужності за критерієм мінімуму втрат активної потужності в темпі реального часу з використанням результатів вимірювання комплексних напруг на початку лінії електропередачі та в точці приєднання *SOP* і значенням комплексного опору лінії електропередачі між цими двома точками. Проаналізовано можливість корегування оптимального значення реактивної потужності в неоднорідній мережі на основі результатів розрахунку за середніми потужностями навантажень вузлів.

В результаті моделювання розподільних електричних мереж, що оснащені *SOP*, за випадкового характеру однієї реалізації навантаження показано, що максимальні втрати напруги зменшилися з 0,25 кВ до 0,2 кВ, а середні значення втрат потужності – з 4,04 кВт до 3,56 кВт. За випадкового характеру навантаження максимальні втрати напруги зменшилися з 0,16 кВ до 0,12 кВ, а середні значення втрат потужності зменшилися з 5,1 кВт до 2,5 кВт.

Одержані наукові результати а саме: матричний метод розрахунку надійності розгалужених розподільних мереж і вибору оптимальних місць розміщення реклоузерів впроваджено в ТОВ «ОПТИМА ЕНЕРДЖИ Україна», що підтверджено довідкою про впровадження від 02.09.2024 р. Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі «Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент» для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», акт впровадження від 11.09.2024 р.

Практична реалізація запропонованого методу сприятиме швидкому досягненню цілей, визначених Концепцією впровадження «розумних мереж», затвердженою Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 908-р від 14 жовтня 2022 року.

ВИСНОВКИ

У монографії висвітлено науково-прикладне завдання підвищення надійності електропостачання споживачів та ефективності електричних мереж операторів систем розподілу.

Основні теоретичні та експериментальні дослідження, які представлені в монографії, можуть бути узагальнені такими висновками:

1. Для підвищення надійності електропостачання споживачів в Україні необхідним є запровадження ефективного регуляторного регулювання та впровадження систем автоматизованого та автоматичного керування електричними мережами операторів систем розподілу. На першому етапі необхідною є встановлення реклоузерів для автоматизованого та автоматичного секціонування розподільних мереж.

2. Запропоновано матричний метод визначення показників надійності розподільних електричних мереж, в основу якого покладено використання матриці шляхів (коефіцієнтів струморозподілу). Метод дозволяє врахувати належність окремих ділень ПЛ до магістралі та відгалужень з урахуванням їх диференційованого впливу на показники надійності, що дає змогу спростити розрахунок та частково автоматизувати визначення місць встановлення реклоузерів.

3. Дістав подальшого розвитку метод реконфігурації розподільних мереж за критерієм мінімуму втрат електроенергії та показниками надійності електропостачання споживачів з перевіркою обмежень щодо максимальних значень втрат напруги у вузлах навантажень і максимальних струмів навантаження ліній електропередачі, який оснований на аналізі чутливості зменшення втрат активної потужності або втрат електроенергії, що полягає у замиканні хорди і розмиканні вітки дерева і ґрунтується на виборі для розмикання найвіддаленішої вітки, що входить в контур, який розмикається, (хорда і вітка, яка розмикається, знаходяться на суміжних відгалуженнях). Початкова орієнтація у разі вибору віток для розмикання виконується на основі розрахунку замкнутої мережі. Вітки з відносно малими струмами визначаються як потенційно оптимальні для розмикання.

4. Проаналізовано застосування *Soft Open Point (SOP)* в мережах 10 кВ операторів систем розподілу для зменшення втрат електроенергії. Розрахунок на реальних даних Ф-33 та Ф-45 Хмельницького РЕМ показав, що застосування *SOP* приводить до зменшення втрат електроенергії на 14,2 %, термін окупності встановлення пристрою становить приблизно 8 років.

Вперше запропоновано метод керування *SOP* за реактивною та активною потужностями за критерієм мінімуму втрат активної потужності в темпі реального часу з використанням результатів вимірювання комплексних напруг на початку лінії електропередачі та в точці приєднання *SOP* і значенням комплексного опору лінії електропередачі між цими двома точками.

Показано, що цей метод дозволяє визначити близькі до оптимального значення реактивні та активні потужності *SOP* для мінімізації втрат електроенергії в електричній мережі в темпі реального часу.

Проаналізовано можливість корегування оптимального значення реактивної потужності в неоднорідній мережі на основі результатів розрахунку за середніми потужностями навантажень вузлів.

В результаті моделювання розподільних електричних мереж, що оснащені *SOP*, з використанням відношення комплексних напруг на початку лінії електропередачі та в точці приєднання *SOP* і комплексного опору лінії електропередачі між цими двома точками за випадкового характеру навантаження забезпечує достатню для практики точність керування.

5. Отримані наукові результати, а саме: матричний метод розрахунку надійності розгалужених розподільних мереж і вибору оптимальних місць розміщення реклоузерів впроваджено в ТОВ «ОПТИМА ЕНЕРДЖИ Україна». Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі “Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] *Grid 2030: A national version for electricity's second 100 years.* – Office of Electric Transmission and Distribution, United States Department of Energy, 89 p., July 2003.

[2] *European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity*, 44 p., 2006. [Electronic resource] – Mode of access: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a2ea8d86-7216-444d-8ef5-2d789fa890fc/language-en>.

[3] *Strategic Research Agenda Update of the SmartGrids. SRA 2007 for the needs by the year 2035*, 72 p., 2012. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf>.

[4] *EPRI's IntelliGridSM initiative*. [Electronic resource]. Mode of access: <http://intelligrid.epri.com>.

[5] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк, «Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення», *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 44-50, 2010. ISSN 1607-7970.

[6] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк, «Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України», *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр. Спец. вип. Ч. 1*. Київ: ІЕД НАН України, с. 5-20, 2011.

[7] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк, «Розвиток інтелектуальних електричних мереж України на основі положень концепції Smart Grid» *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр. Спец. вип.* Київ: ІЕД НАН України, с. 5-13, 2012.

[8] *Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. За заг. ред. акад. НАН України О. В. Кириленка. Інститут електродинаміки НАН України*. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 400 с., 2016.

[9] О. Г. Гриб, Д. А. Гапон, Т. С. Ієрусалімова, М. С. Бєлов, та О. В. Лелека, «Аналіз нормативної бази по проектуванню і побудові систем Smart Grid, яка базується на цифрових підстанціях», *Вісник НТУ «ХПІ»*, № 19 (1128), с. 74-78, 2015. ISSN 2079-4525.

- [10] J. A. Momoh, *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*. Wiley-IEEE Press, 2012.
- [11] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd ed. New York, NY, USA: Plenum, 1996.
- [12] *Reliability of Electric Utility Distribution Systems*: EPRI White Paper 1000424 Final Report, October 2000.
- [13] A. A. Chowdhury and D. O. Koval, *Power Distribution System Reliability-Practical Methods and Applications*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009.
- [14] В. В. Козирський, О. В. Гай, *Методи та моделі розрахунку надійності систем електропостачання : монографія*. Київ: Гнозіс, 2013.
- [15] В. В. Козирський, О. В. Гай, В. А. Костюк, П. В. Петров, «Розгалужена магістраль, як елемент розподільної електричної мережі,» *Енергетика та електрифікація*. № 10, с. 31-33, 2013.
- [16] С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин, *Синтез оптимальной структуры распределительных электрических сетей при неопределенности исходной информации*. Харьков: ООО «В деле», 270 с., 2016.
- [17] С. А. Тимчук, М. А. Сиротенко, С. Я. Бовчалуок. *Синтез оптимального размещения средств повышения эффективности электроснабжения при неопределенности исходной информации*. Харьков: ФЛП Панов А. Н., 116 с., 2018.
- [18] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*. CRC Press, 2018.
- [19] L. Carreiro, *Smart Grids: Efficiency and Reliability in Power Delivery*. Springer, 2021.
- [20] David Littell, Camille Kadoch, Phil Baker, Ranjit Bhavirkar, Max Dupuy, Brenda Hausauer, Carl Linvill, Janine Migden-Ostrander, Jan Rosenow, and Wang Xuan, «Next-Generation Performance-Based Regulation Emphasizing Utility Performance to Unleash Power Sector Innovation,» *Regulatory Assistance Project Owen Zinaman and Jeffrey Logan. National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-6A50-68512*, September 2017, 88 p.

[21] Joel Seppälä and Pertti Järventausta «Analyzing Supply Reliability Incentive in Pricing Regulation of Electricity Distribution Operators,» *Energies*, 17, 1451, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17061451>.

[22] Afroz Alam, Mohd Tariq, Mohammad Zaid, Preeti Verma, Marwan Alsultan, Shafiq Ahmad, Adil Sarwar and Md. Alamgir Hossain, «Optimal Placement of Reclosers in a Radial Distribution System for Reliability Improvement,» *Electronics* 2021, 10, 3182.

<https://www.mdpi.com/journal/electronics>

[23] A. Merlin, H. Back, «Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System,» *In Proceedings of the 1975 Fifth Power Systems Computer Conference (PSCC)*, Cambridge, pp. 1-18, September, 1975.

[24] S. Civanlar, J. Grainger, H. Yin, and S. Lee, «Distribution feeder reconfiguration for loss reduction,» *Power Delivery IEEE Transactionson*, vol. 3, no. 3, pp. 1217-1223, 1988.

[25] M. E. Baran, F. F. Wu, «Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,» *IEEE Trans. Power Deliv.*, 4, pp. 1401-1407, 1989.

[26] T. E. McDermott, I. Drezga, and R. P. Broadwater, «A heuristic non-linear constructive method for distribution system reconfiguration,» *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 478-483, May 1999.

[27] H. P. Schmidt, N. Ida, N. Kagan, J_C Guaraldo, «Fast reconfiguration of distribution system considering loss minimization,» *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 20, no. 3, pp. 1311-1319, Aug. 2005.

[28] F. V. Gomes, S. Carneiro, J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, and P. A. N. Garcia, «A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems,» *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1373-1378, Aug. 2005.

[29] F. V. Gomes, S. Carneiro, J. L. R. Pereira, M. P. Vinagre, P. A. N. Garcia and L. R. de Araujo, «A New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimum Power Flow and Sensitivity Analysis for Loss Reduction,» *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1616-1623, November 2006.

[30] K. R. Niazi, M. R. Farooqi, C. M. Arora, S. L. Surana «Distribution Feeder Reconfiguration for Complex Power Loss

Minimization,» *Proc. of the 3rd IASME/WSEAS Int. Conf. on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, Agios Nikolaos, Greece, July 24-26, 2007*, p. 499-507.

[31] H. Takano, J. Murata, K. Morishita and H. Asano, «Service Restoring Reconfiguration for Distribution Networks Considering Uncertainty in Available Information,» *Appl. Sci.*, 11, 4169, p. 12, 2021.

[32] V. Vai, S. Suk, R. Lorm, C. Chhlonh, S. Eng, L. Bun «Optimal Reconfiguration in Distribution Systems with Distributed Generations Based on Modified Sequential Switch Opening and Exchange,» *Appl. Sci.*, 11, 2146, p. 13, 2021.

[33] K. Nara, A. Shiose, M. Kiagawa and T. Ishihara, «Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration,» *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 7, no. 3, pp. 1044-1051, Aug. 1992.

[34] M. Lin, F. S. Cheng, M. T. Tsay, «Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm,» *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 147, pp. 349-354, Nov. 2000.

[35] J. Z. Zhu, «Optimal reconfiguration of electric distribution network using refined genetic algorithm», *Elect. Pwr. Sys. Res.*, 62, pp. 37-42. 2002.

[36] E. R. Ramos, A. G. Exposito, J. R. Santos and F. L. Iborra, «Path based distribution network modeling: Application to reconfiguration for loss reduction,» *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 20, no. 2, pp. 556-564, May 2005.

[37] C. B. Alexandre, A. C. Delbem, P. L. Carvalho and N. G. Bretas, «Main chain representation of evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration,» *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 20, no. 1, pp. 425-436, Feb. 2005.

[38] K. Prasad, R. Ranjan, N.C. Sahoo, A Chaturvedi, «Optimal configuration of radial distribution system using fuzzy mutated genetic algorithm,» *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 1211-1213, Apr. 2005.

[39] Ying-Yi Hong and Saw-Yu Ho, «Determination of network configuration considering multi-objective in distribution systems using genetic algorithm,» *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 20, no. 2, pp. 1062-1069, May 2005.

[40] B. Tomoiagă, M. Chindriș, A. Sumper, A. Sudria-Andreu and R. Villafafila-Robles, «Pareto Optimal Reconfiguration of Power Distribution Systems Using a Genetic Algorithm Based on NSGA-II,» *Energies*, 6, 1439-1455, 2013. doi:10.3390/en6031439. ISSN 1996-1073. www.mdpi.com/journal/energies .

[41] A. Ghaweta, *Optimal Distribution Feeder Reconfiguration with Distributed Generation using Intelligent Techniques*, Dissertation, University of Kentucky, 2019.

[42] O. Kahouli, H. Alsaif, Y. Bouteraa, N. Ben Ali, M. Chaabene, «Power System Reconfiguration in Distribution Network for Improving Reliability Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization,» *Appl. Sci.*, 11, 3092, 2021.

[43] H. Ghoreishi, H. Afrakhte, M. Jabbari Ghadi «Optimal Placement of Tie Points and Sectionalizers in Radial Distribution Network in Presence of DGs Considering Load Significance,» *Conference: 2013 Smart Grid Conference (SGC)*, p. 160-165, December 2013. DOI:[10.1109/SGC.2013.6733787](https://doi.org/10.1109/SGC.2013.6733787) .

[44] L. Zemite, J. Gerhards, M. Gorobetz, A. Levchenkov, «Optimization of Distribution System Reliability,» *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, vol. 1, no. 3, 2016. ISSN 2450-5730.

[45] C. H. Lin, C. S. Chen, C. J. Wu and M. S. Kang, «Application of immune algorithm to optimal switching operation for distribution loss minimization and load balance,» *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 2, pp. 183-189, March 2003.

[46] H. Kim, Y. Ko, K. H. Jung, «Artificial neural network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution system,» *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 1356-1366, July 1993.

[47] H. Salazar, R. Gallego and R. Romero, «Artificial neural network and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems,» *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 21, no. 3 pp. 1735-1741, July 2006.

[48] Y. J. Hsiao and C. Y. Chen, «Multi objective feeder reconfiguration,» *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 148, pp. 333-336, July 2001.

[49] C. Su, C. Chang, J. Chiou, «Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm,» *Elect. Pwr. Sys. Res.*, 75, pp. 190-199, 2005.

[50] Yuan-Kang Wu, Ching-Yin Lee, Le-Chang Liu, and Shao-Hong Tsai, «Study of Reconfiguration for the Distribution System With Distributed Generators,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1678-1685, July 2010.

[51] Sanjib Ganguly, N. C. Sahoo, D. Das «A novel multi-objective PSO for electrical distribution system planning incorporating distributed generation,» *Energy Systems*, 1(3), 291-337, 2010.

[52] T. Lantharthong, N. Rugthaicharoencheep, «Network Reconfiguration for Load Balancing in Distribution System with Distributed Generation and Capacitor Placement,» *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, vol. 6, no. 4, pp. 409-414, 2012.

[53] D. Das, «A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems,» *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 1, pp. 202-209, Jan 2006.

[54] Y. Jeon, J. Kim, J. Kim, J. Shin, K. Lee, «An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large scale distribution systems,» *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 4, pp. 1070-1078, Oct. 2002.

[55] Y. Chuang, Y. Ke, C. Chen and Y. Chen, «Rule-Expert knowledge based Petri net approach for distribution system temperature adoptive feeder reconfiguration,» *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 21, no. 3, pp. 1362-1370, Aug. 2006.

[56] Pyone Lai Swe «Feeder Reconfiguration and Distributed Generator Placement in Electric Power Distribution Network,» *American Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 56-63, 2018.

[57] S. Lei, J. Wang, and Y. Hou, «Remote-Controlled Switch Allocation Enabling Prompt Restoration of Distribution Systems,» *IEEE*, 2017.

[58] A. Pregelj, M. Begovic, and A. Rohatgi, «Recloser Allocation for Improved Reliability of DG-Enhanced Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1442-1449. August 2006.

[59] P. H. Shah and B. R. Bhalja, "New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser-fuse miscoordination during distributed generation interconnections," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 4, pp. 682-688, Apr. 2014.

[60] A. Fazanehrafat, S. A. M. Javadian, S. M. T. Bathaee, and M.-R. Haghifamt, «Maintaining the recloser-fuse coordination in distribution systems in presence of DG by determining DG's size,» in *Proc. IET 9th Int. Conf. Develop. in Power Syst. Prot.*, Glasgow, Scotland, pp. 132-137, Mar. 2008.

[61] H. Yazdanpanahi, Y. W. Li, and W. Xu, «A new control strategy to mitigate the impact of inverter-based DGs on protection system,» *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1427-1436, Sept. 2012.

[62] L. Kumpulainen and K. Kauhaniemi, «Distributed generation and reclosing coordination,» in *Proc. 2004 Nordic Distrib. & Asset Manag. Conf.*, Espoo, Finland, pp. 1-12, Aug. 2004.

[63] G. E. Valderrama, P. Mattavelli, & A. M. Stankovic, «Reactive Power and Unbalance Compensation Using STATCOM with Dissipativity-Based Control,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 9(5), pp. 718-727, 2001.

[64] M. S. El-Moursi, , & A. M. Sharaf, «Novel controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for voltage regulation and reactive power compensation,» *IEEE Transactions on Power systems*, 20(4), pp. 1985-1997, 2005.

[65] Mahyavanshi, A., Mulla, M. A., & Chudamani, R. «Reactive power compensation by controlling the DSTATCOM,» *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(11), pp. 212-218, 2012.

[66] M. M. Ertay, & A. Zengin, «Analysis of the discontinuous PWM controlled D-STATCOM for reactive power compensation applications,» *Tehnički vjesnik*, 21(4), pp. 825-833, 2014.

[67] W. Rohouma, R. S. Balog, A. A. Peerzada, & M. M. Begovic, «Capacitor-less D-STATCOM for reactive power compensation,» In *2018 IEEE 12th international conference on compatibility, power electronics and power engineering (CPE-POWERENG 2018)*, pp. 1-6, April 2018.

[68] J. Qi, W. Zhao, & X. Bian, «Comparative study of SVC and STATCOM reactive power compensation for prosumer microgrids with DFIG-based wind farm integration,» *IEEE Access*, 8, 209878-209885. 2020.

[69] Kamel Djamel Eddine Kerrouche, Ehtisham Lodhi, Mustapha Boualelem Kerrouche, Lina Wang, Fenghua Zhu, Gang Xiong, *Modeling and design of the improved D-STATCOM control for power distribution grid*. Springer Nature Switzerland AG 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03315-8>.

[70] C. Wang, J. Wu, J. Ekanayake, and N. Jenkins, *Smart Electricity Distribution Networks*. CRC Press. 416 p. 2017.

[71] J. M. Bloemink, and T. C. Green, «Benefits of Distribution-Level Power Electronics for Supporting Distributed Generation Growth,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, p. 911-919, April 2013.

[72] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, T. Green, «Operating principle of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation,» *Applied Energy*, 164, p. 245-257, 2016.

[73] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, T. Green, «Benefits Analysis of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation,» *Applied Energy*, 165, p. 36-47, 2016.

[74] Q. Qi, J. Wu, C. Long, «Multi-objective Operation Optimization of an Electrical Distribution Network with Soft Open Point,» *Applied Energy*, 208, p. 734-744, 2017.

[75] V. Popov, O. Yarmoliuk, V. Tkachenko, I. Frolov, V. Natalych, «Feature of Optimal Network Reconfiguration Problem Statement in Distribution Systems with Local Energy Sources,» *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Випуск 4 (135), с. 53-62, 2022.

[76] A. Farzamnia, S. Marjani, S. Galvani and K. T. T. Kin, «Optimal Allocation of Soft Open Point Devices in Renewable Energy Integrated Distribution Systems,» *IEEE Access*, vol. 10, 2022.

[77] Alwash Shamam, Ibrahim Sarmad, and M. Abed Azher, «Distribution System Reconfiguration with Soft Open Point for Power Loss Reduction in Distribution Systems Based on Hybrid Water Cycle Algorithm,» *Energies*, 16, 199, 22 p., 2023.

[78] Ferry A. Viawan, *Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation*. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 157 p., 2008.

[79] О. С. Яндульський, Г. О. Труніна, А. Б. Нестерко, *Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії*. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 191 с., 2021.

[80] А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, В. А. Попов, О. С. Ярмолук, «Підвищення ефективності керування режимами розподільних мереж за умов застосування розосереджених джерел генерації та засобів акумулювання електроенергії,» *Технічна електродинаміка*, № 3, с. 37-43, 2021. ISSN 1607-7970.

[81] X. P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, 2nd edition*, Berlin: Springer Verlag, 552 p., 2012.

[82] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, Р. О. Слободян, А. Р. Слободян, «Матричний метод визначення показників надійності розгалужених розподільних електричних мереж,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 17-23, 2022.

[83] Бурбело М. Й. , Лобода Ю. В. , Слободян Р. О. «Алгоритм визначення місць встановлення реклоузерів в розгалужених розподільних електричних мережах,» *Proceedings of XVI International Conference Measurement and Control in Complex System (MCCS-2022)*. Vinnytsia, November 15-17, 7 p., 2022.

[84] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, Р. О. Слободян, «Вибір оптимальної конфігурації розподільних електричних мереж,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 23-29, 2023.

[85] Лобода Ю. В., Бурбело М. Й., Слободян Р. О. «Підвищення показників надійності окремого фідера електричної мережі,» *Тези доповіді міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «Молодь в науці 2024»*. Вінниця, 4 с., 2024.

[86] В. В. Каплун, В. В. Осипенко, С. С. Макаревич, *Управління енергоефективністю локальних систем енергоживлення з полігенерацією*. Київ: ФОП Ямчинський О. В., 2020, 318 с. ISBN 978-617-7986-02-6.

[87] Y. Lin, *Microgrid Technology and Engineering Application*. Elsevier, 2016.

[88] J. H. Teng, W. H. Huang, & S. W. Luan, «Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators,» *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(4), pp. 1653-1662, 2014. <http://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2294338> .

[89] A. Khurram, H. Ali, A. Tariq, O. Hasan, «Formal reliability analysis of protective relays in power distribution systems,» in *Formal Methods for Industrial Critical Systems* Berlin/Heidelberg, Springer, pp. 169-183, 2013.

[90] A. Mahmood, O. Hasan, H. Gillani, Y. Saleem, S. Hasan, «Formal reliability analysis of protective systems in smart grids,» in *Region 10 Symposium IEEE*, pp. 198-202, 2016.

[91] M. Sivkumar, D. Debapriya, P. Subrata, «A comprehensive review on power distribution network reconfiguration,» *Energy Systems*, vol. 8 (2), 2016. DOI: 10.1007/s12667-016-0195-7.

[92] L. W. Oliveira, E. J. Oliveira, F. V. Gomes, Jr. I. C. Silva, A. L. M. Marcato, P. V. C. Resende, «Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 56 (1), pp. 64-74, 2014. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.11.008.

[93] A. M. Imran, M. Kowsalya, «A new power system reconfiguration scheme for loss minimization and voltage profile enhancement using fireworks algorithm,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 62(1), pp. 312-322, 2014. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.04.034.

[94] A. Kavousi-Fard, T. Niknam, «Optimal distribution feeder reconfiguration for reliability improvement considering uncertainty,» *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 29, Is. 3, pp. 1344-1353, 2014. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2292951.

[95] L. S. M. Guedes, A. C. Lisboa, D. A. G. Vieira, R. R. Saldanha, «A multiobjective heuristic for reconfiguration of the electrical radial network,» *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 28, Is. 1, pp. 311-319, 2013. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2218260.

[96] Y. Xu, C. C. Liu, K. P. Schneider, D. T. Ton, «Placement of remote-controlled switches to enhance distribution systems restoration capability,» *Proc. IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 1139-1150, 2016. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2419616.

[97] Д. Яценко, В. Попов, А. Замулко та ін., «Застосування індикативного якісного показника при динамічному керуванні топологією розподільної мережі з локальними джерелами енергії з метою мінімізації втрат енергії,» *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки, № 6, Том 2, 2022 (315), с. 109-117.

[98] V. Popov, V. Tkachenko, O. Yarmoliuk, D. Yatsenko, «Actual Trends of Electrical Distribution Systems Automation. Power Systems Research and Operation,» *Studies in Systems, Decision and Control book series*. Switzerland: Springer Cham, pp. 319-346, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-17554-1_14.

[99] А. Ф. Жаркін та ін. «Огляд технологій керування режимами електричних мереж напругою 6...20 кВ з розосередженими джерелами енергії,» *Електронне моделювання*, вип. 43, № 1, с. 46-66, 2021. DOI: 10.15407/emodel.43.01.046.

[100] Про затвердження Кодексу системи передачі зі змінами : постанова національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) від 30.09.2022 р. № 309. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>.

[101] А. Жаркін, В. Попов, О. Ярмолук, В. Наталич «Використання установок зберігання енергії в умовах динамічного керування топологією розподільних мереж,» *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, № 2, с. 153-162, 2023.

[102] А. Р. Слободян, В. В. Чижевський, Р. О. Слободян «Модель роботи розподільної мережі в ізольованому режимі,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 40-49, 2024. ISSN 1997-9266.

[103] Ю. В. Лобода, Р. О. Слободян, «Застосування *Soft Open Point* для оптимізації втрат електроенергії в розподільних електричних мережах,» *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки, № 2, с. 166-170, 2024.

[104] Вартість універсальних послуг для малих побутових споживачів. ТОВ «Хмельницькенергозбут». – Режим доступу : <https://energo.km.ua/Content/Uploads/2023/11/file20231109144328929.pdf>

[105] М. Й. Бурбело, Р. О. Слободян, «Стратегія керування джерелами реактивної потужності в розподільних електричних мережах для оптимізації втрат електроенергії,» *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, № 1, с. 209-214, 2024.

[106] Лобода Ю. В., Бурбело М. Й., Кравець О. М., Слободян Р. О. «Моделювання процесу компенсації реактивної потужності за випадкового характеру навантаження,» *Proceedings of XVI International Conference Measurement and Control in Complex System (MCCS-2024)*. Vinnytsia, October 16-17, 5 p., 2024.

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mccs/mccs2024/paper/view/21940>

[107] М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, Ю. В. Лобода, Р. О. Слободян «Моделювання *Soft Open Point* за випадкового характеру навантаження,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 61-66, 2024. ISSN 1997-9266.

Наукове видання

**Михайло Йосипович Бурбело,
Юрій Васильович Лобода,
Руслан Олександрович Слободян**

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ОПЕРАТОРІВ
СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Рукопис оформив *Ю. В. Лобода*

Оригінал-макет виготовлено у РВВ ВНТУ

Підписано до друку 24.12.2025 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 6,96.
Наклад 40 прим. Зам. 2025-040.

Видавець та виготовлювач –
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
press.vntu.edu.ua
E-mail: rvv.vntu@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.