

УДК 004.84

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-1>

### **Роман БАЗИЛЕВИЧ**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0000-0002-7949-1353

### **Олександр КЛЮШТА**

аспірант кафедри програмного забезпечення, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0009-0002-8701-962X

**Бібліографічний опис статті:** Базилевич, Р., Ключта, О. (2024). Алгоритми острівкування енергетичної системи. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-1>

## **АЛГОРИТМИ ОСТРІВКУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ**

Острівкування енергетичних систем має важливе значення для забезпечення їх надійності та стабільності, особливо в умовах критичних ситуацій, таких як масштабні аварії, природні катастрофи чи технічні збої. **Мета роботи** полягає в дослідженні та аналізі існуючих алгоритмів острівкування енергетичних мереж для забезпечення їх надійності та стабільності в умовах критичних ситуацій, таких як масштабні аварії, природні катастрофи та технічні збої. **Методологія.** Використано методологію теоретичного аналізу для розгляду кількох сучасних алгоритмів острівкування енергетичних мереж, включаючи алгоритм спектральної кластеризації для контрольованого острівкування, алгоритм острівкування розподільчих мереж з розподіленими генераторами, що використовує модель направленої графа, двоступеневий підхід на основі Crow Search Optimizer, алгоритм ієрархічної декомпозиції та трьохетапний метод, що включає алгоритм самоприспосувального спрощення графів, алгоритм пошуку розривів ізоляції та алгоритм перевірки схем ізоляції. Особлива увага була приділена дослідженню можливостей масштабування цих алгоритмів.

Виявлено, що деякі з цих алгоритмів мають обмеження, пов'язані з масштабованістю у випадку великих енергетичних мереж, що може призводити до зниження їх ефективності та надійності. Як рішення цієї проблеми пропонується використання алгоритму ієрархічної декомпозиції, який дозволяє розділяти складні мережі на частини. Це сприятиме більшій гнучкості та адаптивності управління, збільшуючи можливості для інтеграції відновлювальних джерел і зменшуючи вразливості від централізованих порушень.

**Наукова новизна** роботи полягає в аналізі обмеження сучасних методів острівкування, пов'язані з масштабованістю у великих енергетичних мережах, та пропозиція використання алгоритму ієрархічної декомпозиції як рішення цієї проблеми. Підхід ієрархічної декомпозиції дозволяє розділяти складні мережі на частини, що сприяє більшій гнучкості та адаптивності управління, збільшуючи можливості для інтеграції відновлювальних джерел і зменшуючи вразливості від централізованих порушень.

**Висновки.** Впровадження таких інноваційних методів сприяє підвищенню стабільності енергосистем, та відкриває нові можливості для оптимізації їх роботи. Завдяки підходу острівкування на основі ієрархічної декомпозиції покращити надійність постачання та адаптивність систем до змінних умов, що стає дедалі важливішим у контексті глобальних змін клімату та екологічних викликів.

**Ключові слова:** енергетичні мережі, острівкування, ієрархічна декомпозиція.

### **Roman BAZYLEVYCH**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Lviv Polytechnic National University, 12, Stepana Bandera Str., Lviv, Ukraine, 79000, roman.p.bazylevych@lpnu.ua

ORCID: 0000-0002-7949-1353

### **Oleksandr KLIUSHTA**

Postgraduate Student at the Department of Software Engineering, Lviv Polytechnic National University, 12, Stepana Bandera Str., Lviv, Ukraine, 79000, oleksandr.v.kliushta@lpnu.ua

ORCID: 0009-0002-8701-962X

**To cite this article:** Bazylevych, R., Kliushta, O. (2024). Alhorytmy ostrivkuvannia enerhetychnoi systemy [Power system islanding algorithms]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-1>

## POWER SYSTEM ISLANDING ALGORITHMS

*Islanding energy systems plays a crucial role in ensuring their reliability and stability, particularly during critical situations such as large-scale accidents, natural disasters, or technical failures. This study aims to investigate and analyze existing algorithms for islanding energy networks to ensure their reliability and stability in such critical situations. Methodology. The study employs a theoretical analysis methodology to review several contemporary algorithms for islanding energy networks. These include the spectral clustering algorithm for controlled islanding, the islanding algorithm for distribution networks with distributed generators using a directed graph model, a two-step approach based on the Crow Search Optimizer, the hierarchical decomposition algorithm, and a three-stage method comprising the self-adaptive graph simplification algorithm, the isolation cut search algorithm, and the isolation scheme verification algorithm. Special attention is given to exploring the scalability of these algorithms.*

**Findings.** *It was found that some of these algorithms have limitations related to scalability in the context of large energy networks, potentially leading to decreased efficiency and reliability. As a solution, the use of the hierarchical decomposition algorithm is proposed, which allows for the partitioning of complex networks. This facilitates greater flexibility and adaptability in management, enhances integration capabilities for renewable sources, and reduces vulnerabilities from centralized disruptions.*

**Scientific novelty** of this work lies in the analysis of the limitations of current islanding methods related to scalability in large energy networks and the proposal to use the hierarchical decomposition algorithm as a solution. The hierarchical decomposition approach allows for the partitioning of complex networks, promoting greater flexibility and adaptability in management, enhancing integration capabilities for renewable sources, and reducing vulnerabilities from centralized disruptions.

**Conclusions.** *The implementation of such innovative methods contributes to enhancing the stability of energy systems and opens new possibilities for optimizing their operation. The islanding approach based on hierarchical decomposition improves supply reliability and system adaptability to changing conditions, which is becoming increasingly important in the context of global climate change and environmental challenges.*

**Key words:** energy networks, islanding, hierarchical clustering.

**Актуальність теми.** Актуальність сучасного управління енергетичними системами зростає у зв'язку з постійним збільшенням споживання електроенергії та необхідністю інтеграції відновлюваних джерел енергії. Одним із важливих аспектів управління великими енергетичними системами є їх острівкування, що дозволяє підвищити надійність та стабільність під час аварійних відключень або в умовах екстремальних зовнішніх впливів.

Острівкування енергетичних систем, яке полягає у формуванні самостійно функціонуючих островів мережі у випадку порушення її роботи, є важливим для забезпечення їх безпеки. Визначення оптимальних точок для роз'єднання мережі дозволяє швидко реагувати на можливі збої, мінімізуючи їх негативний вплив на споживачів.

Значний інтерес представляє інноваційний підхід, який базується на алгоритмі ієрархічної декомпозиції. Цей метод дозволяє детально аналізувати мережеві структури, виділяючи ключові вузли та зв'язки, які можуть слугувати надійними точками для формування островців стійкості в мережі. Ієрархічна декомпозиція сприяє більш ефективному розподілу ресурсів, кращому управлінню навантаженнями та підвищенню якості енергопостачання в критичних ситуаціях.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питанням оптимізації та острівкування енергетичних систем присвячена значна увага в роботах як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. Цими проблемами займалися, зокрема, Губко М., Гінц В. (Goubko, Ginz, 2017), Хуа Ж. (Zheshen, 2015), Картикумар К., Кумар В. (KarthiKumar, Kumar, 2021), а також Базилевич Р. та інші. Їхні праці є основою для розробки і реалізації нових методик щодо острівкування енергетичними мережами, забезпечення їх надійності та стабільності.

Наприклад, Губко М., Гінц В. запропонували алгоритм спектральної кластеризації для контрольованого острівкування енергетичних мереж, що забезпечує ефективне розділення мережі на островки з мінімізацією порушення потоку енергії (Goubko, Ginz, 2017). Хуа Ж. розробив модель острівкування енергетичних мереж з розподіленими генераторами на основі направленої графу, що дозволяє автоматизувати процес вибору та управління островними операціями (Zheshen, 2015).

Картикумар К., Кумар В. запропонували двоступеневий підхід на основі Opposition Crow Search Optimizer (OCSO) для острівкування в енергетичних мережах, який враховує різноманітні обмеження, включаючи пропускну

здатність ліній та пріоритет навантаження (KarthiKumar, Kumar, 2021).

Аналізуючи наукові доробки з теми дослідження, можна говорити про активне застосування різноманітних методів та алгоритмів для острівкування енергетичних мереж як у вітчизняному, так і у світовому суспільстві. Зважаючи на збільшення можливостей та потужності обчислювальної техніки, методи прогнозування та управління стають все складнішими та охоплюють все більші обсяги даних.

Серед переваг запропонованих алгоритмів можна виділити їхню високу ефективність, швидкість виконання та здатність адаптуватися до змін у структурі мережі та режимах її роботи. Однак існують і обмеження, зокрема складність виконання для великих мереж та потреба у точних даних для оптимального моделювання.

Отже, наукові праці з теми острівкування енергетичних мереж демонструють широкий спектр підходів та методів, що сприяють підвищенню надійності та стабільності енергетичних систем, забезпечуючи їх ефективне управління в умовах екстремальних зовнішніх впливів та аварійних ситуацій.

**Метою статті** є аналіз існуючих алгоритмів острівкування енергетичних мереж з визначення їх ефективності.

**Викладення основного матеріалу.** Острівкування енергетичних мереж є важливим елементом сучасних енергетичних систем, забезпечуючи можливість підтримки їх стабільності в умовах автономної роботи окремих їх частин. Це стає особливо важливим у контексті збільшення частки відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. Окремі острівні системи не тільки сприяють підвищенню енергетичної незалежності, але й забезпечують безпеку для індивідуальних регіонів або навіть окремих споживачів, зокрема в географічно віддалених або важкодоступних місцях. Важливим аспектом ефективності острівних систем є їх здатність адаптуватися до швидких змін умов експлуатації, зокрема до зміни кількості електроенергії виготовленими відновлюваними джерелами. Це вимагає розробки спеціалізованих алгоритмів управління, які могли б оптимально розподіляти доступні ресурси, мінімізувати ризики пов'язані з нестабільністю виробітку та споживання, а також ефективно керувати збереженням енергії. Важливим для розробників острівних систем є створення надійних механізмів передбачення стану ізоляції від основної мережі та подальшого управління енергетичними потоками без зовнішнього втручання. Такі системи

мають бути спроможні самостійно підтримувати стабільність енергопостачання, регулювати навантаження, і, при потребі, залучати резервні джерела енергії. Розвиток острівних систем вимагає окремого підходу до нововведень, які б могли забезпечити їх ефективність та адаптивність до динамічно змінюваних умов експлуатації.

**Об'єкт дослідження** – Енергетичні мережі.

**Предмет дослідження** – алгоритми острівкування енергетичних мереж.

**Завдання дослідження:**

- аналіз методів та алгоритмів острівкування енергетичних мереж.
- дослідження впливу існуючих методів та алгоритмів острівкування на ефективність енергетичних систем.
- дослідження алгоритму ієрархічної декомпозиції та можливості його застосування для вирішення проблеми острівкування.

У статті оглянуто алгоритми та методи острівкування енергетичних мереж. Проаналізовано різні підходи, їх переваги та недоліки, а також запропоновано використання алгоритму ієрархічної декомпозиції як вирішення проблеми острівкування. Острівкування сприяє підвищенню гнучкості мереж, підвищенню їх надійності та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Метою острівкування є забезпечення енергетичної безпеки та надійності. У випадках, коли центральна мережа перебуває в нестабільному стані через природні катастрофи, аварії або планові відключення, острівні системи забезпечують неперервне постачання енергії об'єктам критичної інфраструктури чи навіть всім споживачам електроенергії в межах острівків.

Для аналізу та планування острівкування в енергетичних системах використовуються декілька моделей та методів, що дозволяють дослідити системи внаслідок острівкування, оцінити їх ефективність та розробляти стратегії для оптимізації взаємодії компонентів системи.

**Моделювання енергетичних систем за допомогою графів.** Графові моделі використовуються для представлення енергетичних мереж як сукупності вузлів (генераторів, споживачів, вузлів зберігання) та зв'язків (передвальних ліній). Цей підхід дозволяє аналізувати потоки енергії, визначати можливі точки відмови, та розробляти стратегії для забезпечення надійності та ефективності острівних операцій. Один з алгоритмів острівкування енергетичних мереж, що ґрунтується на моделюванні за допомогою графів, є алгоритм спектральної класифікації для контрольованого острівкування енергетичних мереж (Goubko, 2017, с. 59-94).

Цей алгоритм спрямований на ефективне розділення мережі на острівки з мінімізацією порушення потоку енергії, відключення навантажень та збереження згуртованості генераторів усередині кожного острівка. На першому етапі алгоритму використовуються кілька стратегій спектральної кластеризації для зниження розмірності задачі. Використовуючи інструменти CPLEX, на другому етапі вибирається збалансований розподіл агрегованої мережі. Алгоритм має добру ефективність і швидкість, забезпечуючи придатність для мереж з тисячами вузлів і підтримуючи мінімальні порушення в роботі мережі під час критичних ситуацій. На рис. 1 відображено різницю між результатами кластерування за допомогою алгоритму K-середніх та спектральної кластеризації.

Переваги алгоритму:

- ефективність – алгоритм забезпечує високу якість розділення і має невеликий час виконання, що робить його придатним для мереж з тисячами вузлів;
- алгоритм дозволяє виконання декількох критеріїв, зокрема збільшення згуртованості генераторів усередині островів, зменшення порушення потоку потужності через розірвані лінії та мінімізацію відключення навантаження.

Недоліки алгоритму:

- складність виконання для великих мереж. Алгоритм є ефективним для малих мереж, проте його застосування стає більш ресурсозатратним при збільшенні розміру мережі;
- потреба у точних даних. Для оптимального моделювання необхідними є детальні дані про мережу, що може бути викликом у деяких реальних умовах;
- вимагає використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як CPLEX, що може обмежувати його доступність та вартість впровадження.

Іншим алгоритмом моделювання за допомогою графів для острівкування в системах розподіленої генерації є алгоритм острівкування мереж з розподіленими генераторами (Zheshen, 2015). Алгоритм використовує структурні особливості розподільчих систем для побудови направленої графу, що дозволяє ефективно керувати процесом острівкування, враховуючи пріоритетність навантаження та керованість операцій генераторів. Цей підхід дозволяє автоматизувати процес вибору та управління острівними операціями, забезпечуючи оптимізацію енергопостачання.

Переваги алгоритму:

- оптимізація енергопостачання – алгоритм забезпечує високу якість оптимізації за рахунок точного керування розподіленими генераторами;
- гнучкість та адаптивність – алгоритм легко адаптується до змін у структурі мережі та режимах її роботи;
- автоматизація процесів – автоматичне виявлення та управління процесами острівкування спрощує оперативне втручання.

Недоліки алгоритму:

- складність реалізації – налаштування та підтримка моделі у вигляді направленої графу можуть бути складними та вимагати спеціальних знань;
- обмежене застосування – метод може бути не таким ефективним у мережах з високою складністю та змінною топологією.

Двоступеневий підхід на основі Opposition Crow Search Optimizer (OCSO) використовується для острівкування в енергетичних мережах (KarthiKumar, 2021). Метод враховує різноманітні обмеження, включаючи пропускну здатність ліній, напругу на шинах, пріоритет навантаження та керованість навантаження.

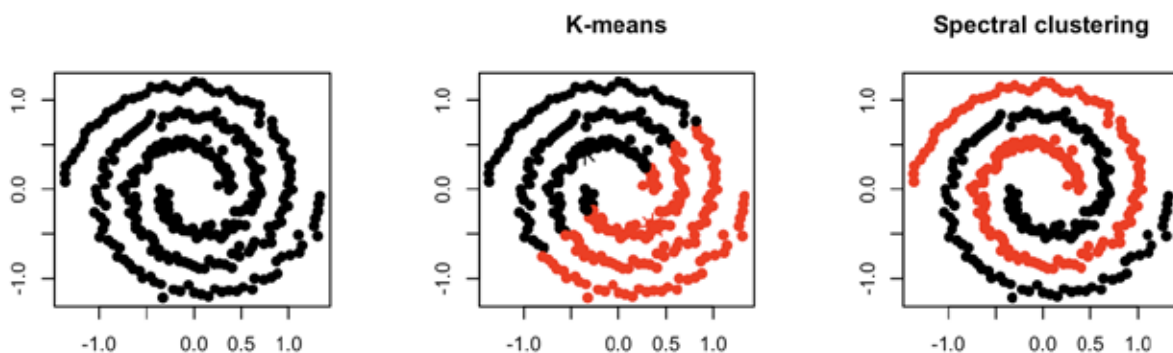


Рис. 1. Кластеризація алгоритмів K-середніх та спектральної кластеризації / Clustering by the K-means and spectral

У першому кроці проблема розглядається як задача рюкзака на деревах (Tree Knapsack Problem, ТКР). OCSO дозволяє поліпшити профіль збіжності і швидкість обчислень. OCSO використовує опозиційне навчання для ініціалізації популяції, що дозволяє значно покращити результати. На другому етапі перевіряється, що створені острови відповідають усім технічним вимогам і обмеженням системи.

Переваги:

- Використання OCSO дозволяє швидше знаходити оптимальні рішення, завдяки опозиційному навчанню та стрибковому поколінню.
- Метод забезпечує стабільність і надійність роботи мікромереж, враховуючи ключові обмеження і пріоритети навантаження. Це особливо важливо для підтримки критичних навантажень у разі ізоляції.
- Підхід може бути адаптований до різних конфігурацій енергосистем, що робить його універсальним інструментом для мікромереж. Він може легко інтегруватися з іншими системами управління та оптимізації.

Недоліки:

- Впровадження двоступеневого підходу може вимагати значних обчислювальних ресурсів і досвіду в галузі оптимізації. Це може вимагати додаткових витрат на апаратне забезпечення та навчання персоналу.
- OCSO може іноді зупинятися на локальних оптимумах, не досягаючи глобального оптимального рішення. Це потребує додаткових методів для запобігання такій ситуації.

Двоступеневий підхід на основі Crow Search Optimizer є потужним інструментом для острівкування енергетичних мереж. Він ефективно вирішує ключові обмеження та оптимізує процес острівкування, надаючи надійне рішення для сучасних енергосистем.

Трьохетапний метод острівкування з метою запобігання масштабним відключенням електроенергії включає алгоритм самоприспосувального спрощення графів, алгоритм пошуку розрізів ізоляції та алгоритм перевірки схем ізоляції (XU, Shaoxiang & MIAO, 2017). Метод застосовується для виявлення розрізів з мінімальним дисбалансом навантаження-генерація або мінімальним порушенням потоків потужності, забезпечуючи при цьому відповідність умовам напруги.

Переваги:

- Метод автоматично адаптується до різних умов роботи системи та конфігурацій мережі, що дозволяє використовувати його у різноманітних ситуаціях;
- забезпечує високу точність у знаходженні оптимальних розрізів ізоляції з мінімальним

дисбалансом навантаження-генерація та мінімальним порушенням потоків потужності;

- здатний забезпечити швидкий пошук оптимальних розрізів, що робить його придатним для реального часу застосування.

Недоліки:

- Впровадження методу може вимагати значних зусиль з боку інженерів та налаштування системи під специфічні потреби кожної енергосистеми;
- реалізація метода може вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо для великих енергосистем.

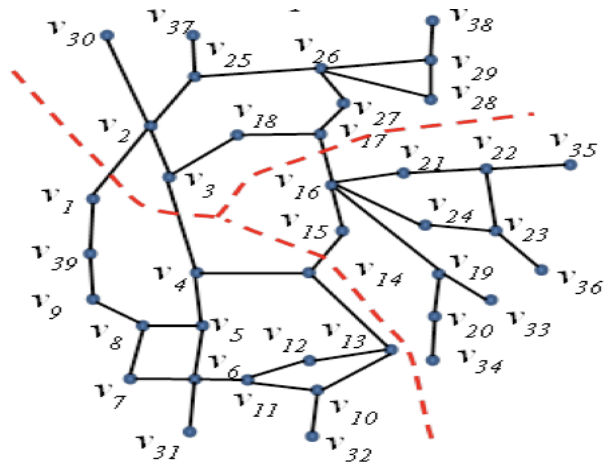
Трьохетапний метод демонструє високу адаптивність, точність та ефективність, що робить його перспективним для застосування в умовах сучасного ринку електроенергії. Попри певні недоліки, такі як складність впровадження та вимоги до обчислювальних ресурсів, метод має значний потенціал для широкого використання.

Наведені алгоритми демонструють, як методи кластеризації можуть ефективно вирішувати проблеми острівкування в енергетичних мережах, забезпечуючи стабільність та надійність під час екстрених ситуацій. Проте варто зауважити, що наведені методи не є ефективними, коли мережа містить більше 1000 вершин в графі.

**Алгоритм ієрархічної декомпозиції.** Для острівкування доцільно також використати метод оптимального згортання схеми (Базилевич, 2000; Базилевич, 2007; Базилевич, 2013;). За цим методом пропонується розбиття схеми здійснювати в декілька етапів: виділення ієрархічно вкладених кластерів шляхом згортання схеми за вибраними критеріями, вибір на дереві згортання бажаного початкового розбиття, найкраще наближення до заданих обмежень та його оптимізація. Як показали дослідження, метод має лінійно-логіарифмічну обчислювальну складність, що робить його придатним для задач великих розмірностей, можливість забезпечення різноманітних обмежень, зокрема вибору довільної кількості частин розбиття, виконання багаторівневого розбиття та забезпечує високу якість отриманих розв'язків. Алгоритм має бути важливим інструментом у системному аналізі та управлінні складними системами, що дозволяє розділити складну задачу або систему на менші частини, що спрощує процес управління та аналізу. Складна система розбивається на декілька підсистем або модулів, кожен з яких може бути оптимізований окремо. Це спрощує управління складними системами, роблячи кожен модуль відносно

незалежним та легшим для аналізу. Алгоритм дозволяє організувати систему у вигляді ієрархії її структури, де кожен рівень має виконувати свої функції. Ієрархічна декомпозиція є ефективною для управління великими, складними системами, зокрема такими як виробничі лінії, корпоративні структури, або транспортні мережі. Оскільки алгоритм дозволяє ефективно використовувати ресурси, оскільки кожна підсистема може бути оптимізована окремо. Системи, розроблені за принципом ієрархічної декомпозиції, легко адаптуються до змін у зовнішньому середовищі та можуть бути масштабовані за необхідності з мінімальними змінами у загальній структурі. Також за допомогою алгоритму ієрархічної декомпозиції можна розділити мережу на острівки з мінімальною кількістю зв'язків між вершинами (рис. 2) (Базилевич, 2019).

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У ході дослідження здійснено аналіз існуючих алгоритмів острівкування в енергетичних мережах, включаючи моделювання за допомогою графів, спектральну кластеризацію, для мереж з розподіленими генераторами. Існуючі алгоритми острівкування ефективні для невеликих мереж, оскільки мають великі обчислювальні витрати. Алгоритм ієрархічної декомпозиції показав свою ефективність в оптимізації великих систем. Застосування цього алгоритму дозволяє ефективно управляти складними мережами, забезпечуючи їх стабільність та



**Рис. 2. Розбиття схеми IEEE-39 Bus Station за допомогою ієрархічної декомпозиції / Breakdown of the IEEE-39 Bus Station circuit using hierarchical decomposition**

надійність, і сприяє підвищенню гнучкості та адаптивності енергетичних систем.

Використання сучасних алгоритмів острівкування є ефективним для забезпечення стабільності та надійності енергетичних систем. Алгоритм ієрархічної декомпозиції має високу ефективність, забезпечуючи масштабованість та використання для оптимізації великих енергетичних систем. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізації цих алгоритмів для їх адаптації до складних енергетичних мереж.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Goubko M., Ginz V. Improved spectral clustering for multi-objective controlled islanding of power grid. *Energy Systems*, 10, 2017. 59–94. <https://doi.org/10.1007/S12667-017-0240-1>.
2. Zheshen H. Islanding Model of Distribution Systems with Distributed Generators Based on Directed Graph. *Automation of electric power systems*. 2015.
3. KarthiKumar Kuppusamy, Kumar, V. A new opposition crow search optimizer-based two-step approach for controlled intentional islanding in microgrids. *Soft Computing*. 2021. 25. 10.1007/s00500-020-05280-1.
4. XU Shaoxiang, MIAO Shihong. Three-stage method for intentional controlled islanding of power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2017. 6. 10.1007/s40565-017-0348-2.
5. R. P. Bazylevych, R. A. Melnyk, O. G. Rybak. «Circuit partitioning for FPGAs by the optimal circuit reduction method». In: *VLSI Design*, Vol. 11, No 3, pp. 237–248, 2000.
6. Bazylevych R. P. «The optimal circuit reduction method as an effective tool to solve large and very large size intractable combinatorial VLSI physical design problems». In: 10-th NASA Symp. on VLSI Design, March 20-21, 2002, Albuquerque, NM, USA, pp. 6.1.1–6.1.14.
7. R. Bazylevych, I. Podolskyu and L. Bazylevych. «Partitioning optimization by recursive moves of hierarchically built clusters». In: *Proc. of 2007 IEEE Workshop on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems*. April, 2007, Krakow, Poland, pp. 235–238.
8. Roman Bazylevych, Marek Pałasiński, Dmytro Yanush, Lubov Bazylevych. «Partitioning Optimization by Iterative Reassignment of the Hierarchically Built Clusters with Border Elements», 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO – 2013, Budva, Montenegro, pp.219–222.
9. Левус Є. В., Василюк Р. Б. Рекомендаційний алгоритм із використанням кластеризації даних. *Український журнал інформаційних технологій*. 2022, т. 4, № 2. С. 18–24.
10. Su J., Bai H., Zhang P., Liu H., Miao S. Intentional Islanding Algorithm for Distribution Network Based on Layered Directed Tree Model. *Energies*, 9, 2016. 1–21. <https://doi.org/10.3390/EN9030124>.

11. Laasasenaho K., Lensu A., Lauhanen R., Rintala, J. GIS-data related route optimization, hierarchical clustering, location optimization, and kernel density methods are useful for promoting distributed bioenergy plant planning in rural areas. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 32, 2019. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.01.006>
12. Bazylevych Roman, Bazylevych Lubov. Power System Islanding by the Hierarchical Clustering. 2019. 10.1109/STC-CSIT.2019.8929837.

#### REFERENCES:

1. Goubko, M., & Ginz, V. (2017). Improved spectral clustering for multi-objective controlled islanding of power grid. *Energy Systems*, 10, 59–94. <https://doi.org/10.1007/S12667-017-0240-1>
2. Zheshen, H. (2015). Islanding model of distribution systems with distributed generators based on directed graph. *Automation of Electric Power Systems*.
3. KarthiKumar, K., & Kumar, V. (2021). A new opposition crow search optimizer-based two-step approach for controlled intentional islanding in microgrids. *Soft Computing*, 25. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05280-1>
4. Xu, S., & Miao, S. (2017). Three-stage method for intentional controlled islanding of power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0348-2>
5. Bazylevych, R. P., Melnyk, R. A., & Rybak, O. G. (2000). Circuit partitioning for FPGAs by the optimal circuit reduction method. *VLSI Design*, 11(3), 237–248.
6. Bazylevych, R. P. (2002). The optimal circuit reduction method as an effective tool to solve large and very large size intractable combinatorial VLSI physical design problems. In 10-th NASA Symposium on VLSI Design (pp. 6.1.1–6.1.14), Albuquerque, NM, USA.
7. Bazylevych, R., Podolskyy, I., & Bazylevych, L. (2007). Partitioning optimization by recursive moves of hierarchically built clusters. In *Proceedings of the 2007 IEEE Workshop on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems* (pp. 235–238), Krakow, Poland.
8. Bazylevych, R., Palasinski, M., Yanush, D., & Bazylevych, L. (2013). Partitioning optimization by iterative reassignment of the hierarchically built clusters with border elements. In *2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO – 2013* (pp. 219–222), Budva, Montenegro.
9. Levus, Ye. V., & Vasylyuk, R. B. (2022). Rekomendatsiyni alhorytm iz vykorystanniam klasteryzatsii danykh [Recommender algorithm using data clustering]. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 4(2), 18–24 [in Ukrainian].
10. Su, J., Bai, H., Zhang, P., Liu, H., & Miao, S. (2016). Intentional islanding algorithm for distribution network based on layered directed tree model. *Energies*, 9(1-21). <https://doi.org/10.3390/EN9030124>
11. Laasasenaho, K., Lensu, A., Lauhanen, R., & Rintala, J. (2019). GIS-data related route optimization, hierarchical clustering, location optimization, and kernel density methods are useful for promoting distributed bioenergy plant planning in rural areas. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 32, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.01.006>
12. Bazylevych, R., & Bazylevych, L. (2019). Power system islanding by the hierarchical clustering. 10th International Conference on Advanced Computer Science and Information Technologies (STC-CSIT). <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929837>