

БАЗИЛЕВИЧ РОМАН

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-7949-1353>email: roman.p.bazylevych@lpnu.ua**КЛЮШТА ОЛЕКСАНДР**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0009-0002-8701-962X>email: oleksandr.v.kliushhta@lpnu.ua

ОСТРІВКУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ІЄРАРХІЧНОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ

У даній роботі представлено застосування ієрархічної декомпозиції для острівкування енергосистем, що дозволяє розділяти великі мережі на автономні підсистеми, мінімізуючи перетини між ними. Це сприяє забезпеченню стійкості системи, ефективності управління та стабільності роботи у випадку аварій або зовнішніх загроз.

Ключові слова: Енергетичні мережі, острівкування, ієрархічна декомпозиція.

BAZYLEVYCH ROMAN, KLIUSHTA OLEKSANDR

Lviv Polytechnic National University

POWER SYSTEM ISLANDING WITH HIERARCHICAL CLUSTERING

Power systems islanding is important for ensuring their reliability and stability, especially in critical situations, such as large-scale accidents, natural disasters or technical failures. The purpose of this paper is to present and theoretically justify an approach to power systems islanding based on a hierarchical decomposition. This solution is aimed at increasing the resilience, adaptability and efficiency of power systems in crisis situations, such as large-scale accidents, cyber attacks or infrastructure damage. The methodology is based on the use of a hierarchical decomposition algorithm that allows complex power grids to be divided into autonomous subsystems or 'islands'. To evaluate the effectiveness of this approach, we used the IEEE-118 test system, which is widely used in power system modelling. The study involves a sequential partitioning of the network.

The scientific novelty of the study lies in the introduction of hierarchical decomposition as an innovative method for islanding power systems. The proposed approach demonstrates the ability to localise faults and minimise the consequences of accidents, while maintaining the overall stability of the network. The use of software engineering principles, such as modularity, encapsulation, and separation of functionality, ensures the efficiency and scalability of this approach. The study also shows that hierarchical decomposition can be successfully adapted to the conditions of real systems, in particular the Ukrainian power system, which is characterised by diverse load profiles and high vulnerability to cascading failures.

The conclusions emphasise that the introduction of hierarchical decomposition can significantly improve power systems reliability and flexibility, ensuring island autonomy and reducing the load on central control units. This opens up opportunities for the integration of renewable energy sources, which is an important step in the context of global environmental challenges and the need to modernise energy infrastructure. For Ukraine, proposed approach is particularly valuable as it allows to ensure the continuity of energy supply even in crisis situations arising from military operations or large-scale damage to infrastructure. Thus, hierarchical decomposition is a powerful tool for increasing the resilience of energy systems and reducing their vulnerability to external threats.

Keywords: Energy networks, islanding, hierarchical clustering.

Постановка проблеми

Постановка проблеми визначається сучасними викликами, які постають перед енергетичними системами, особливо у контексті великих розподілених мереж, таких як енергомережа України. Глобальні процеси модернізації енергетичної інфраструктури, зростання складності мереж і збільшення ризиків аварійних ситуацій вимагають впровадження нових підходів до забезпечення стабільності й безпеки енергопостачання. В умовах України актуальність цієї теми набуває ще більшої значущості через постійні загрози для енергетичної інфраструктури, спричинені військовими діями, кібератаками та пошкодженнями ключових об'єктів. Масштабні відключення електроенергії, викликані аваріями або навмисними атаками, створюють загрозу для функціонування критично важливих об'єктів, таких як лікарні, водопостачальні системи й урядові установи. У таких умовах підвищення стійкості енергомережі є питанням національної безпеки. Острівкування енергомереж, як концепція розбиття системи на автономні підмережі, що здатні функціонувати незалежно, пропонує ефективне рішення для зменшення впливу аварій. Це дозволяє забезпечувати безперервність електропостачання критичних споживачів, навіть у разі масштабних порушень у роботі загальної системи. Використання ієрархічної декомпозиції як підходу до острівкування відкриває нові можливості для структуризації управління, знижуючи складність і підвищуючи адаптивність системи до змінних умов. Ця тема є актуальною не лише для України, але й для глобальної енергетичної галузі, яка стикається з дедалі більшими викликами у забезпеченні стабільного енергопостачання в умовах зростання складності мереж і частих кризових ситуацій. У цьому контексті дослідження нових підходів до управління енергосистемами, зокрема через ієрархічну декомпозицію, є важливим внеском у розвиток сучасних технологій і підвищення надійності енергетичної інфраструктури.

Аналіз досліджень та публікацій

Сучасні дослідження в галузі управління енергетичними системами зосереджені на підвищенні стійкості та ефективності енергомереж шляхом впровадження різних інноваційних підходів, одним з яких є

контрольоване острівкування. Численні публікації підкреслюють важливість адаптивних стратегій для управління великими розподіленими енергетичними мережами, особливо в умовах високої невизначеності та частих порушень. Одним із ключових напрямів досліджень є застосування теорії графів для моделювання та оптимізації топології енергосистем. У роботах акцентується увага на потенціалі кластеризації та розбиття графів для ідентифікації оптимальних конфігурацій автономної роботи мереж.

Наприклад, Базилевич (2019) запропонував метод ієрархічної кластеризації, який спрощує острівні рішення з майже лінійною обчислювальною складністю, демонструючи придатність для додатків реального часу [1]. Аналогічно, Ван (2023) представив метод вкладеної декомпозиції для оптимального потоку потужності, досягнувши підвищеної ефективності та масштабованості у великомасштабних мережах [2]. Ключовою тенденцією останніх досліджень є інтеграція багатоцільової оптимізації в ієрархічні структури. Аміні (2020) представив техніку керованої ізоляції з використанням спектральної кластеризації для генерації множинних рішень щодо ізоляції, балансування узгодженості генерації навантаження та мінімізації збоїв [3]. Dabbaghjamanesh (2020) вдосконалив цей підхід за допомогою багаторівневої обмеженої кластеризації, досягнувши чудової відмовостійкості та стабільності при застосуванні до системи IEEE-118 [4]. Валідація в реальних умовах також набуває все більшої популярності. Нещодавні застосування на стандартних тестових системах, таких як система IEEE-118, та на практичних мережах довели здатність ієрархічної декомпозиції локалізувати збої та підвищити загальну стабільність. Базилевич (2019) ефективно продемонстрував модульність та ізоляцію несправностей, проклавши шлях до ширшого застосування в операційних системах, таких як енергосистема України [1]. Хоча ці досягнення підкреслюють потенціал ієрархічної декомпозиції, в реальних реалізаціях залишаються проблеми, особливо щодо застосування зі старими системами та динамічної адаптації до екстремальних подій. Усунення цих прогалин за допомогою пілотних проєктів та застосування аналітики, керованої штучним інтелектом, має вирішальне значення для повної реалізації переваг ієрархічних структур.

Метою статті є теоретичне обґрунтування та практична перевірка підходу до острівкування енергомереж, заснованого на ієрархічній декомпозиції, з метою підвищення стійкості, ефективності та адаптивності енергосистем у складних умовах.

Викладення основного матеріалу

В сучасних енергомережах трапляються численні виклики, обумовлені зростанням складності інфраструктури, масштабів споживання та потребою забезпечення надійності у складних і мінливих умовах. Острівкування енергомереж є одним із ключових підходів, що дозволяє підвищити стійкість системи, розділяючи її на автономні частини, які здатні працювати незалежно одна від одної. Такий підхід не лише знижує масштаби впливу аварій, але й забезпечує мінімально необхідне електропостачання для критично важливих споживачів. Головна ідея острівкування полягає в тому, щоб мережа могла бути швидко перебудована на автономний режим роботи окремих сегментів, зберігаючи при цьому баланс між генерацією та споживанням енергії. У цьому контексті проблема формування островів стає багатовимірною задачею, яка потребує врахування топології мережі, характеристик споживачів та потужностей, здатних забезпечити стабільну роботу в умовах ізоляції. Таким чином, острівкування енергомереж стає не лише важливим інструментом підвищення надійності системи, але й стратегічним рішенням для забезпечення безперервності енергопостачання в умовах криз.

У роботі представлено підхід, заснований на принципах ієрархічної декомпозиції, для забезпечення стабільної роботи енергосистем у складних умовах. Цей підхід спрямований на вирішення низки ключових проблем, що супроводжують процес острівкування, зокрема складність управління великими розподіленими системами та необхідність оперативного прийняття рішень. У роботі пропонується використання ієрархічної декомпозиції, яка дозволяє розбити задачу на кілька рівнів управління. Це сприяє зменшенню обчислювальної складності та покращенню керованості системою, що особливо важливо для масштабних мереж, таких як українська енергосистема. Одним із головних внесків статті є демонстрація ефективності запропонованого підходу на прикладі тестової системи IEEE-118. Результати дослідження ілюструють, як ієрархічна декомпозиція дозволяє розбити енергосистему на островки, підвищити стійкість мережі до зовнішніх впливів і забезпечити мінімізацію втрат. Впровадження таких підходів може стати основою для розвитку більш надійної енергетичної інфраструктури.

Ієрархічна декомпозиція є концепцією, яка базується на розділенні складної системи на взаємопов'язані підсистеми або рівні, кожен із яких виконує певні функції та взаємодіє з іншими на чітко визначених умовах. У контексті острівкування енергомереж, ієрархічна декомпозиція дозволяє структурувати задачу розбиття мережі на автономні підмережі, зменшуючи обчислювальну складність і підвищуючи ефективність процесу управління. Основна ідея цього підходу полягає в тому, щоб спростити управління складними системами, використовуючи багаторівневу структуру [5]. Вищі рівні відповідають за загальне планування та координацію, тоді як нижчі займаються виконанням локальних завдань. Такий підхід забезпечує розподіл завдань і знижує навантаження на центральні вузли управління, що є особливо важливим для великих розподілених систем, таких як українська енергомережа. У контексті острівкування енергомереж ієрархічна декомпозиція дозволяє ефективно вирішувати проблему розбиття системи, зосереджуючи увагу на локальних аспектах, таких як баланс потужності та надійність, у межах кожного підрозділу. Водночас на глобальному рівні забезпечується загальна координація для досягнення системної стійкості та мінімізації втрат [6]. Ієрархічна декомпозиція базується на принципах, які включають

модульність, інкапсуляцію та розподіл функціональності. Їхнє впровадження в задачах острівкування енергомереж дозволяє структурувати систему таким чином, щоб забезпечити ефективне управління навіть у масштабних і динамічних мережах. Модульність передбачає поділ складної системи на відносно незалежні компоненти. У контексті енергомереж це означає розбиття мережі на автономні підсистеми (острови), кожна з яких відповідає за балансування генерації та навантаження. Це дає змогу спростити управління, адже локальні проблеми вирішуються на рівні відповідного острова без необхідності залучення центрального керування. Інкапсуляція дозволяє зменшити взаємозалежність між окремими компонентами системи, визначаючи чіткі правила їхньої взаємодії. У задачах острівкування це означає, що кожен острів функціонує автономно, маючи чітко визначені входи та виходи, які забезпечують мінімальний обсяг інформації для інтеграції в загальну систему. Завдяки цьому досягається більша стабільність роботи всієї мережі, навіть за умов зовнішніх впливів чи пошкоджень [7]. Розподіл функціональності на різних рівнях ієрархії дозволяє розподілити обчислювальне навантаження між локальними і глобальними рівнями управління. Вищі рівні ієрархії зосереджуються на глобальному балансуванні енергоресурсів і загальній стратегії управління мережею. Натомість нижчі рівні відповідають за локальні рішення, такі як оптимальне розподілення потужностей або реагування на аварійні ситуації в межах окремих островів. Застосування цих принципів до енергомереж має низку переваг. По-перше, це спрощує аналіз і моделювання мережі, оскільки кожен рівень ієрархії може бути опрацьований незалежно. По-друге, це підвищує керованість і прозорість системи, що особливо важливо для великих і складних мереж. По-третє, це сприяє підвищенню стійкості мережі до зовнішніх впливів, оскільки пошкодження або збої на одному рівні не ведуть до катастрофічних наслідків для всієї системи. Таким чином, інтеграція принципів програмної інженерії в ієрархічне управління енергосистемами створює основу для їхньої масштабованості, адаптивності та ефективності [8]. Дослідження в галузі острівкування енергомереж, які застосовують ієрархічний підхід, демонструють значний прогрес у вирішенні проблем складності та масштабованості сучасних енергосистем. У багатьох роботах ієрархічна декомпозиція використовується як основний метод для структуризації задач управління, дозволяючи розподіляти функції між різними рівнями управління та забезпечувати автономність підмереж.

Ієрархічний підхід до острівкування енергомереж має ряд переваг у порівнянні з традиційними методами, особливо у великих і складних системах. Однією з ключових переваг є здатність ієрархічної декомпозиції зменшувати обчислювальну складність задач. У той час як традиційні методи, такі як жадібні алгоритми чи оптимізаційні підходи, часто стикаються з обмеженнями через високу розмірність системи, ієрархічний підхід дозволяє розбивати завдання на окремі рівні, кожен із яких обробляється незалежно. Це знижує навантаження на центральні вузли управління та дозволяє працювати із системами значно більшого масштабу. Ще однією важливою перевагою ієрархічного підходу є його адаптивність до динамічних змін у системі. Традиційні методи часто орієнтовані на статичну конфігурацію мережі й потребують перерахунків у разі змін у генерації або споживанні [9]. Ієрархічна декомпозиція, навпаки, дозволяє локальним рівням автономно адаптуватися до змін, зберігаючи загальну стійкість системи. Наприклад, нижні рівні можуть оперативно реагувати на аварії чи локальні перевантаження, не очікуючи команд із центрального вузла. Окрім того, ієрархічний підхід забезпечує кращу масштабованість. У традиційних методах будь-яке збільшення кількості вузлів чи з'єднань у мережі значно ускладнює виконання завдань. Натомість ієрархічна структура дозволяє додавати нові підмережі або вузли без суттєвого впливу на загальну складність управління [10]. Це особливо актуально для України, де пошкодження енергомережі часто потребують реорганізації системи та інтеграції нових компонентів у процесі відновлення інфраструктури. Традиційні методи також мають обмеження у врахуванні багатофакторних обмежень, таких як фізичні характеристики мережі або економічні пріоритети. Ієрархічний підхід дозволяє враховувати ці фактори на різних рівнях управління [11]. Наприклад, верхній рівень може вирішувати стратегічні питання, зосереджуючись на мінімізації втрат енергії чи витрат на обслуговування, тоді як нижні рівні забезпечують локальне балансування потужностей із урахуванням поточних умов. Незважаючи на переваги, ієрархічний підхід також має свої обмеження. Зокрема, його впровадження вимагає ретельного налаштування комунікації між рівнями, щоб уникнути надмірних затримок або конфліктів між локальними та глобальними рішеннями [10]. У деяких випадках централізовані методи можуть бути більш ефективними, особливо для невеликих систем із фіксованою структурою. Таким чином, ієрархічна декомпозиція має суттєві переваги у контексті масштабованості, адаптивності та ефективності управління енергомережами. Вона демонструє більшу гнучкість і стійкість у порівнянні з традиційними методами, що робить її перспективним інструментом для вирішення завдань острівкування.

Застосування ієрархічної декомпозиції. Схематичне представлення ієрархічної декомпозиції мережі на прикладі системи IEEE-118 ілюструє, як складну енергосистему можна розділити за допомогою ієрархічної декомпозиції. Система IEEE-118 - це стандартний тестовий випадок, який широко використовується в дослідженнях енергосистем для оцінки методологій та алгоритмів експлуатації та управління мережею. Це спрощена модель реальної електромережі, що забезпечує достатню складність для імітації практичних викликів, зберігаючи при цьому керований масштаб для тестування.

Система IEEE-118 є розширенням системи IEEE-30 і включає в себе:

- 118 вузлів, що є точками генерації, передачі або споживання енергії.
- 186 Ліній електропередач, які з'єднують вузли та формують основу мережі.

Цей тестовий приклад характеризується поєднанням міських центрів з високим навантаженням та сільських районів з низьким навантаженням, що імітує експлуатаційну різноманітність, яка зустрічається в реальних мережах. Він включає кілька критично важливих коридорів електропередачі та регіони з щільним підключенням, що робить його ідеальним представленням складної взаємопов'язаної системи. Система IEEE-118 є особливо цінною для тестування стратегій острівного розподілу завдяки своїм розмірам та різноманітності. Вона забезпечує реалістичний сценарій для вивчення проблем поділу мережі на стабільні, самодостатні острови.

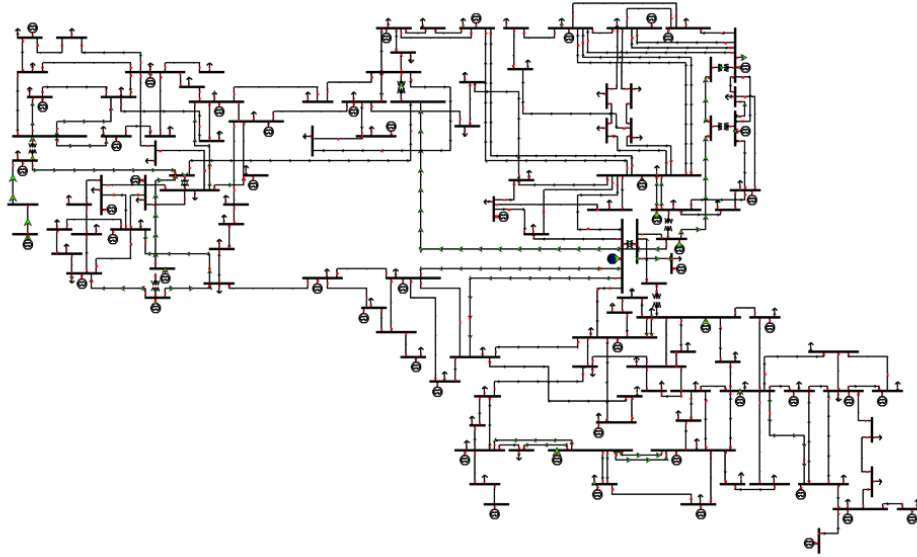


Рис. 1. Система IEEE-118

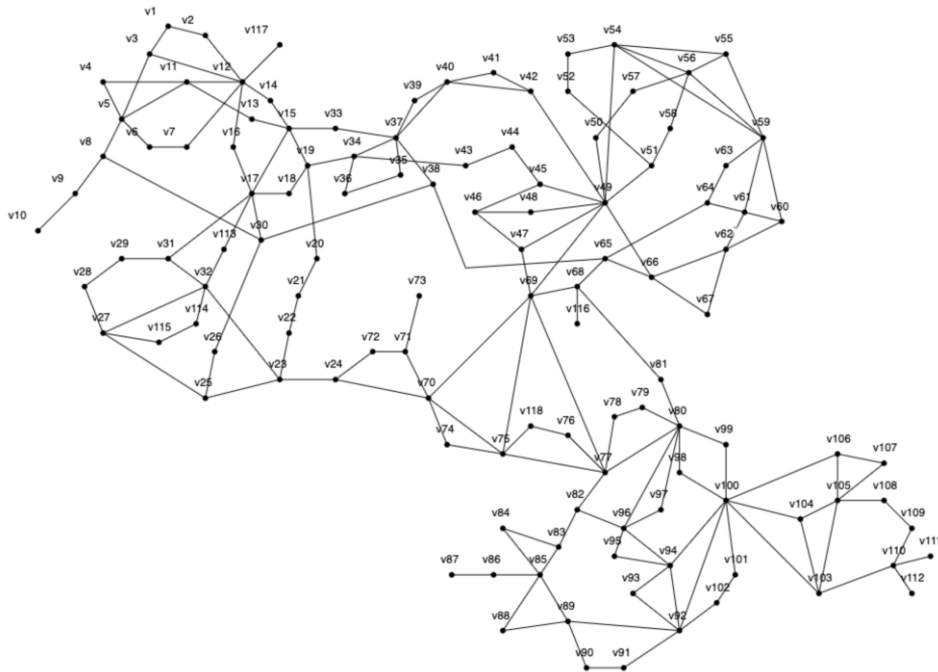


Рис. 2. Система IEEE-118 у вигляді графу

Таблиця 1

Порядок об'єднання вершин під час першого кроку

$v'1 = [v8; v9; v10]$	$v'6 = [v115; v116]$	$v'11 = [v85; v86; v87]$	$v'16 = [v68; v116]$
$v'2 = [v1; v2]$	$v'7 = [v20; v21; v22]$	$v'12 = [v90; v91]$	$v'17 = [v53; v52]$
$v'3 = [v12; v117]$	$v'8 = [v73; v71]$	$v'13 = [v101; v102]$	$v'18 = [v43; v44]$
$v'4 = [v6; v7]$	$v'9 = [v76; v118]$	$v'14 = [v110; v111; v112]$	$v'19 = [v35; v36]$
$v'5 = [v28; v29]$	$v'10 = [v78; v79]$	$v'15 = [v108; v109]$	$v'20 = [v106; v107]$

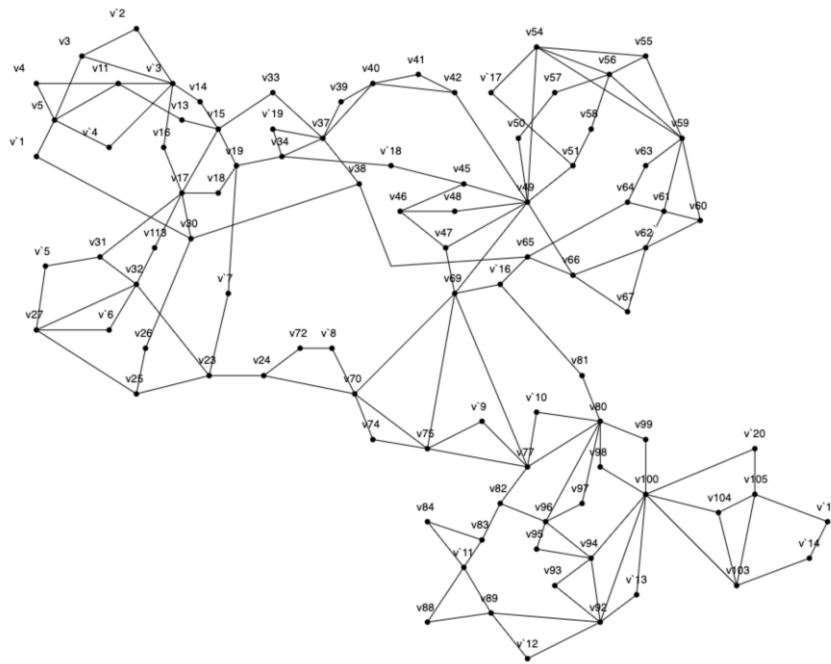


Рис. 3. Вигляд системи IEEE-118 після першого кроку

Таблиця 2

Порядок об'єднання вершин під час другого кроку

$v''1 = [v'2; v'3; v'14; v'4; v'3]$	$v''7 = [v'80; v'81; v'97; v'10]$	$v''13 = [v'54; v'55; v'56]$
$v''2 = [v'4; v'5; v'1]$	$v''8 = [v'83; v'84; v'11; v'88; v'89; v'12; v'92]$	$v''14 = [v'60; v'61]$
$v''3 = [v'16; v'17; v'18; v'113]$	$v''9 = [v'94; v'95; v'96]$	$v''15 = [v'66; v'67]$
$v''4 = [v'25; v'26]$	$v''10 = [v'98; v'99; v'100; v'13; v'20]$	$v''16 = [v'50; v'57]$
$v''5 = [v'8; v'72]$	$v''11 = [v'39; v'40; v'41; v'42]$	$v''17 = [v'51; v'58]$
$v''6 = [v'74; v'75; v'9]$	$v''12 = [v'63; v'64]$	$v''18 = [v'46; v'48]$



Рис. 4. Вигляд системи IEEE-118 після другого кроку

Таблиця 3

Порядок об'єднання вершин під час третього кроку

$v'''1 = [v'19; v'37; v''11]$	$v'''6 = [v'34; v'18]$	$v'''11 = [v'62; v''14]$
$v'''2 = [v'15; v'13; v'33]$	$v'''7 = [v'6; v'27; v'5; v'31; v'32]$	$v'''12 = [v'17; v''17; v''13]$
$v'''3 = [v''1; v''2; v'11]$	$v'''8 = [v'23; v']$	$v'''13 = [v'45; v''18; v'47]$
$v'''4 = [v''10; v'104; v'105; v'103; v'14; v'15]$	$v'''9 = [v''5; v'70; v''6]$	
$v'''5 = [v''8; v'93; v''9; v'82]$	$v'''10 = [v''12; v'59]$	

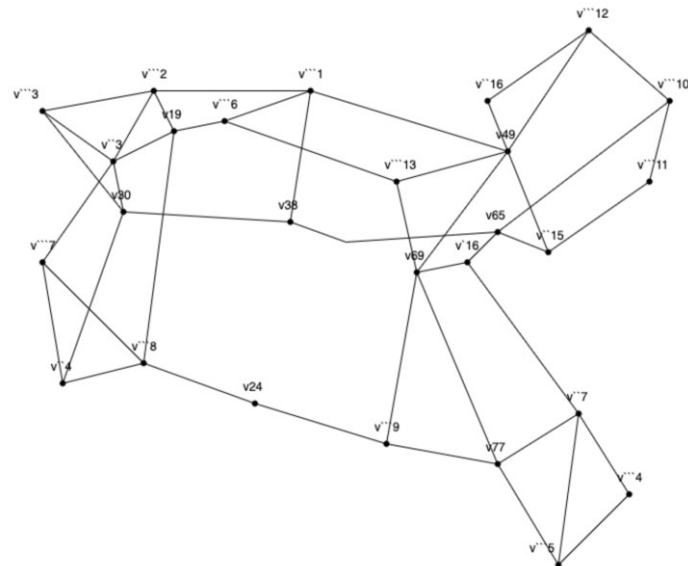


Рис. 5. Вигляд системи IEEE-118 після третього кроку

Таблиця 4

Порядок об'єднання вершин під час четвертого кроку

$v^*1 = [v'''5; v'''4; v''7; v'77]$	$v^*4 = [v''15; v'''11]$
$v^*2 = [v'''3; v'''2; v''3; v'30; v'19]$	$v^*5 = [v''16; v'''12]$
$v^*3 = [v''4; v'''7; v'''8]$	$v^*6 = [v'''9; v'24]$

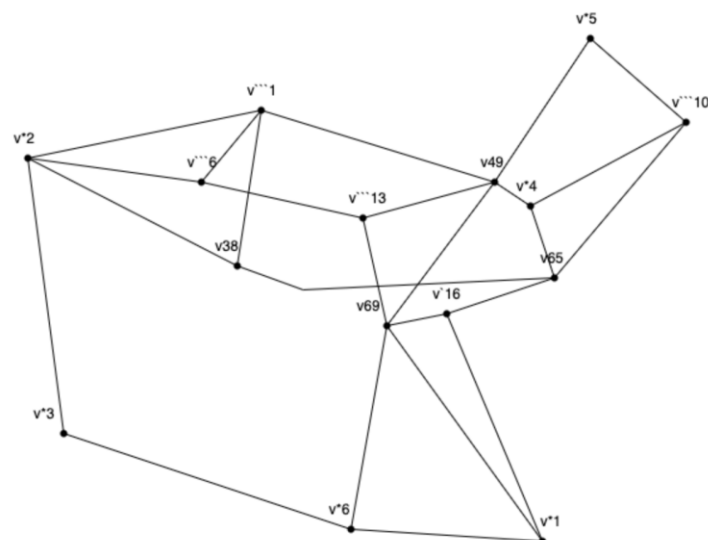


Рис. 6. Вигляд системи IEEE-118 після четвертого кроку

Таблиця 5

Порядок об'єднання вершин під час п'ятого кроку

$v^{**1} = [v_{49}; v_{*5}; v^{''10}; v_{*4}]$	$v^{**4} = [v_{*1}; v_{*6}]$
$v^{**2} = [v_{65}; v_{38}]$	$v^{**5} = [v^{16}; v_{69}]$
$v^{**3} = [v_{*2}; v_{*3}; v^{''6}]$	$v^{**6} = [v^{''6}; v^{''11}]$

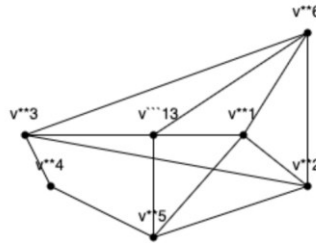


Рис. 7. Вигляд системи IEEE-118 після 5-го кроку

Таблиця 6

Порядок об'єднання вершин під час шостого кроку

$v^{***1} = [v^{**1}; v^{''13}]$	$v^{***2} = [v^{**4}; v^{**5}]$
----------------------------------	---------------------------------

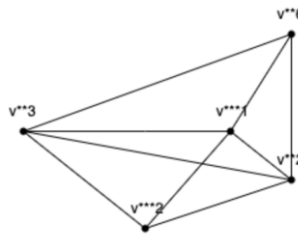


Рис. 8. Вигляд системи IEEE-118 після шостого кроку

Таблиця 7

Порядок об'єднання вершин під час сьомого кроку

$$v^{****1} = [v^{**2}; v^{***1}]$$

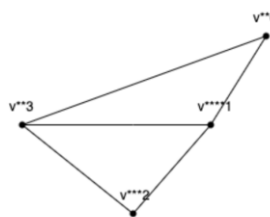


Рис. 9. Вигляд системи IEEE-118 після 7-го кроку

Таблиця 8

Порядок об'єднання вершин під час восьмого кроку

$$v^{*****1} = [v^{**2}; v^{****1}]$$



Рис. 10. Вигляд системи IEEE-118 після 8-го кроку



- критичні коридори електропередач. Ключові лінії електропередач в Україні з'єднують її західні та східні регіони, подібно до життєво важливих з'єднань в системі IEEE-118.

- Вразливість до перебоїв. Обидві системи підкреслюють важливість надійних стратегій розділення для управління ризиком каскадних збоїв. Система IEEE-118 забезпечує баланс між складністю та простотою, що робить її ідеальною платформою для тестування ієрархічної декомпозиції. Для України досвід, отриманий на прикладі системи IEEE-118, може бути використаний при розробці та впровадженні ієрархічних структур, які вирішують унікальні проблеми національної мережі. Адаптуючи принципи, продемонстровані в цьому тестовому випадку, оператори можуть підвищити стійкість мережі та забезпечити безперервність постачання під час надзвичайних ситуацій.

Висновки

Підхід ієрархічної декомпозиції пропонує трансформаційне вирішення проблем острівкування енергомереж, вирішуючи питання масштабованості, адаптивності та стійкості в управлінні складними системами. Поділяючи мережу на острови, ієрархічна декомпозиція забезпечує ізоляцію несправностей, спрощує прийняття рішень та забезпечує локальну стабільність при зберіганні загальної координації. Цей підхід наочно представлено на конкретних прикладах, таких як система IEEE-118, що продемонструвало його здатність створювати оптимальні острови. Актуальність ієрархічної декомпозиції поширюється і на реальні застосування, зокрема, в енергосистемі України, де вона може посилити стійкість до збоїв і захистити критично важливу інфраструктуру. Хоча методологія добре показала себе у моделюванні, необхідними є подальші дослідження для вирішення практичних проблем, таких як сумісність із застарілими системами, адаптивність у реальному часі та всебічна перевірка в реальних енергосистемах. Підхід ієрархічної декомпозиції є прикладом синергії між енергетичними системами та програмною інженерією. Адаптуючи принципи, що традиційно використовуються при розробці програмного забезпечення, цей підхід пропонує масштабоване та ефективне рішення критично важливої проблеми в управлінні енергетичними мережами. Для фахівців з програмної інженерії розробка інструментів та алгоритмів для підтримки ієрархічної декомпозиції відкриває нові шляхи для досліджень та застосування.

Література

1. Bazylevych, R., Wrzesien, M., & Bazylevych, L. (2019). Power System Islanding by the Hierarchical Clustering. *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 1, 145-148. <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929837>.
2. Wang, Q., Lin, C., Wu, W., Wang, B., Wang, G., Liu, H., Zhang, H., & Zhang, J. (2023). A Nested Decomposition Method for the AC Optimal Power Flow of Hierarchical Electrical Power Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38, 2594-2609. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3194077>.
3. Dabbaghjamesh, M., Wang, B., Kavousi-Fard, A., Mehraeen, S., Hatziargyriou, N., Trakas, D., & Ferdowsi, F. (2020). A Novel Two-Stage Multi-Layer Constrained Spectral Clustering Strategy for Intentional Islanding of Power Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35, 560-570. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2915342>.
4. Wang, Q., Lin, C., Wu, W., Wang, B., Wang, G., Liu, H., Zhang, H., & Zhang, J. (2023). A Nested Decomposition Method for the AC Optimal Power Flow of Hierarchical Electrical Power Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38, 2594-2609. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3194077>.
5. Cohen-Addad, V., Kanade, V., Mallmann-Trenn, F., & Mathieu, C. (2019). Hierarchical Clustering. *Journal of the ACM (JACM)*, 66, 1 - 42. <https://doi.org/10.1145/3321386>.
6. Yang, W., Wang, X., Lu, J., Dou, W., & Liu, S. (2020). Interactive Steering of Hierarchical Clustering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27, 3953-3967. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2995100>.
7. Agarwal, A., Khanna, S., Li, H., & Patil, P. (2022). Sublinear Algorithms for Hierarchical Clustering. *ArXiv*, abs/2206.07633. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.07633>.
8. Long, T., & Noord, N. (2023). Cross-modal Scalable Hyperbolic Hierarchical Clustering. 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 16609-16618. <https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.01527>.
9. F. Znidi, H. Davarikia, K. Iqbal, and M. Barati, "Multi-layer spectral clustering approach to intentional islanding in bulk power systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 1044–1055, Jul. 2019.
10. A. Ghosal, A. Nandy, A. K. Das, S. Goswami, and M. Panday, "A short review on different clustering techniques and their applications," in *Emerging Technology in Modelling and Graphics*, Singapore, 2020, pp. 69–83.
11. Knittel, M., Springer, M., Dickerson, J., & Hajiaghayi, M. (2023). Fair Polylog-Approximate Low-Cost Hierarchical Clustering. *ArXiv*, abs/2311.12501. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.12501>.

References

1. Bazylevych, R., Wrzesien, M., & Bazylevych, L. (2019). Power System Islanding by the Hierarchical Clustering. *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 1, 145-148. <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929837>.

2. Wang, Q., Lin, C., Wu, W., Wang, B., Wang, G., Liu, H., Zhang, H., & Zhang, J. (2023). A Nested Decomposition Method for the AC Optimal Power Flow of Hierarchical Electrical Power Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38, 2594-2609. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3194077>.
3. Dabbaghjamanesh, M., Wang, B., Kavousi-Fard, A., Mehraeen, S., Hatziargyriou, N., Trakas, D., & Ferdowsi, F. (2020). A Novel Two-Stage Multi-Layer Constrained Spectral Clustering Strategy for Intentional Islanding of Power Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35, 560-570. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2915342>.
4. Wang, Q., Lin, C., Wu, W., Wang, B., Wang, G., Liu, H., Zhang, H., & Zhang, J. (2023). A Nested Decomposition Method for the AC Optimal Power Flow of Hierarchical Electrical Power Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38, 2594-2609. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3194077>.
5. Cohen-Addad, V., Kanade, V., Mallmann-Trenn, F., & Mathieu, C. (2019). Hierarchical Clustering. *Journal of the ACM (JACM)*, 66, 1 - 42. <https://doi.org/10.1145/3321386>.
6. Yang, W., Wang, X., Lu, J., Dou, W., & Liu, S. (2020). Interactive Steering of Hierarchical Clustering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27, 3953-3967. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2995100>.
7. Agarwal, A., Khanna, S., Li, H., & Patil, P. (2022). Sublinear Algorithms for Hierarchical Clustering. ArXiv, abs/2206.07633. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.07633>.
8. Long, T., & Noord, N. (2023). Cross-modal Scalable Hyperbolic Hierarchical Clustering. 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 16609-16618. <https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.01527>.
9. F. Znidi, H. Davarikia, K. Iqbal, and M. Barati, "Multi-layer spectral clustering approach to intentional islanding in bulk power systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 1044–1055, Jul. 2019.
10. A. Ghosal, A. Nandy, A. K. Das, S. Goswami, and M. Panday, "A short review on different clustering techniques and their applications," in *Emerging Technology in Modelling and Graphics*, Singapore, 2020, pp. 69–83.
11. Knittel, M., Springer, M., Dickerson, J., & Hajiaghayi, M. (2023). Fair Polylog-Approximate Low-Cost Hierarchical Clustering. ArXiv, abs/2311.12501. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.12501>.