



UDC 004.2

MORPHOLOGICAL MODELING OF SMART GRID: SPATIAL METRICS FOR ANALYSIS OF DISTRIBUTED ENERGY NETWORKS

МОРФОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ SMART GRID: ПРОСТОРОВІ МЕТРИКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ РОЗПОДІЛЕНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ

Komenda N.V. / Коменда Н.В.*Ph.D., as. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-5944-8665

Volynets V.I. / Волинець В.І.*Ph.D., as. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-9192-2785

Komenda D.T. / Коменда Д.Т.*Ph.D. student / аспірант**Lutsk National Technical University, Lutsk, Lvivska St., 75, 43018**Луцький національний технічний університет, Луцьк, Львівська, 75, 43018*

Анотація. У статті представлено удосконалений підхід до просторового моделювання Smart Grid, що базується на використанні морфометричних метрик для опису геометрії та топологічних характеристик сучасних розподілених енергетичних мереж. На відміну від класичних електротехнічних методів аналізу морфометричний підхід розглядає енергосистему як просторову структуру і дозволяє кількісно оцінити щільність розміщення елементів, ступінь зв'язності, компактність маршрутів електропередачі, фрактальність мережесих контурів та узгодженість розташування генерувальних і споживчих вузлів. Запропоновані показники (ρ , B , L_a , C , D_f) дають можливість формалізувати морфологію Smart Grid й оцінити її потенціал до саморегуляції, стійкості та адаптації в умовах змінного навантаження. Показано, що просторовий морфометричний аналіз є структурним аналогом морфометрії графіка електричного навантаження, що забезпечує єдину методологічну основу для дослідження нерівномірностей у часі та просторі. На прикладі міської мікромережі продемонстровано, що оптимізація морфологічних параметрів сприяє зменшенню втрат, підвищенню рівня енергоавтономності та надійності системи. Зроблено висновок, що морфологічне моделювання відкриває нові можливості для конфігураційного планування Smart Grid, інтеграції DER, просторової оптимізації та підвищення ефективності децентралізованих енергетичних систем.

Ключові слова: Smart Grid, морфологічне моделювання, просторові метрики, морфометричний аналіз, DER, енергоефективність.

Вступ.

Сучасна електроенергетика перебуває у стані масштабної трансформації, що зумовлена переходом від централізованих систем генерації до децентралізованих та гібридних енергетичних структур [1, 2]. Активне впровадження розподілених джерел енергії (DER) — сонячних і вітрових станцій, акумуляторних комплексів, мікромереж — формує нову архітектуру Smart Grid, яка поєднує фізичні, інформаційні та комунікаційні процеси в єдину кіберфізичну систему [3].



Традиційні електротехнічні підходи, що зосереджуються на режимах і параметрах електричних мереж, здебільшого не враховують просторову неоднорідність і топологічну складність сучасних розподілених систем [4]. У зв'язку з цим виникає потреба в методах, які дозволяють оцінювати не лише енергетичні характеристики мережі, а й морфологічні властивості її просторової структури — зв'язність, щільність, конфігурацію та фрактальні особливості [5].

Відсутність інтегрованої методики, що поєднувала б енергетичне моделювання з морфометричним аналізом просторової організації Smart Grid, ускладнює оптимізацію конфігурації, керування потоками енергії та забезпечення стійкості до динамічних змін у системі [6]. Тому актуальним є розроблення морфометричного підходу до моделювання Smart Grid, який би враховував як технічні, так і просторово-структурні параметри сучасних децентралізованих енергетичних систем [7].

У науковій літературі проблематика розвитку та моделювання Smart Grid найчастіше розглядається з позицій інформаційно-комунікаційних технологій, контролю стану мережі та кібербезпеки.

У роботі Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. [1] подано системний огляд архітектури Smart Grid, принципів її побудови та викликів, що виникають під час інтеграції DER. Автори підкреслюють роль автоматизованого керування, двостороннього обміну інформацією та активного застосування відновлюваної генерації.

У дослідженні Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T. [2] детально аналізуються технічні аспекти створення Smart Grid — мережеві протоколи, комунікаційні технології та проблеми кіберзахисту. Водночас просторово-топологічна структура енергетичних елементів у цих роботах практично не оцінюється за допомогою формалізованих кількісних методів.

Класична праця Kundur, P. [3] присвячена питанням стабільності електроенергетичних систем і пропонує математичні моделі динаміки мереж. Проте вона не охоплює особливостей децентралізованих і фрактальних структур, характерних для сучасних Smart Grid.



У вітчизняних дослідженнях, зокрема в роботі Мартинюк О. В. та Ковальчук А. С. [4], розглядаються принципи побудови інтелектуальних електричних мереж та їх інтеграція у концепцію Smart City. Хоча автори приділяють увагу адаптивному управлінню, морфометричні аспекти просторової структури енергомережі не були предметом аналізу.

Найближчим за тематикою є підхід, запропонований Хомутовим О. М. [5], який обґрунтував застосування морфометричного аналізу до структур енергетичних мереж. Дослідження демонструє можливість використання показників щільності, зв'язності та фрактальної розмірності для оцінки їх топології. Проте запропоновані методи ще не адаптовані до гібридних кіберфізичних систем типу Smart Grid.

Отже, огляд доводить наявність потреби у розвитку підходів, що інтегрують енергетичне моделювання з морфометричним аналізом просторової структури Smart Grid, забезпечуючи нові індикатори ефективності та надійності децентралізованих систем.

Метою роботи є розроблення підходу до енергетичного моделювання Smart Grid на основі морфометричного аналізу, що дає можливість оцінювати ефективність і надійність системи з урахуванням просторових характеристик її елементів.

Для реалізації поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

Узагальнити сучасні методи енергетичного моделювання Smart Grid [1, 3].

Визначити морфометричні параметри, придатні для кількісного опису структури Smart Grid [5].

Навести приклад розрахунку морфометричних характеристик мікромережі з DER [4].

Основний текст.

Моделювання Smart Grid здійснено на основі морфометричного підходу, сутність якого полягає у вимірюванні просторових параметрів енергомережі та визначенні індексів її структури [5].

До основних морфометричних показників Smart Grid віднесено:



Щільність джерел енергії:

$$\rho = \frac{N_{DER}}{A}, \quad (1)$$

де N_{DER} - кількість розподілених джерел енергії, A - площа обслуговування.

Коефіцієнт збалансованості:

$$B = \frac{P_{gen}}{P_{load}}, \quad (2)$$

який характеризує співвідношення між генерованою та споживаною потужністю.

Середня довжина енергетичного шляху:

$$L_a = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}, \quad (3)$$

де d_{ij} - мінімальна відстань між вузлами i та j .

Індекс зв'язності (Connectivity Index):

$$C = \frac{L}{N(N-1)/2}, \quad (4)$$

де L - кількість зв'язків між вузлами, N - кількість вузлів мережі.

Фрактальна розмірність (Fractal Dimension):

$$N(r) \sim r^{D_f}, \quad (5)$$

яка описує складність просторової конфігурації Smart Grid.

Застосування таких показників дозволяє кількісно охарактеризувати топологію мережі та визначити її здатність до саморегуляції в умовах змінних навантажень [2, 5].

Для демонстрації методики було змодельовано мікромережу у житловому районі площею 10 км² з 20 сонячними електростанціями, 2 акумуляторними станціями, 1 підстанцією та 100 споживачами.

Розраховані морфометричні параметри: $\rho = 0,2$ (помірна щільність DER) – оптимальна для міських умов, $B = 0,9$ (90% локального самозабезпечення) – висока енергоефективність, $L_a = 0,35$ км (короткі енергетичні шляхи) – низькі втрати потужності, $C = 0,62$ (добра зв'язність мережі) – достатній рівень резервування, $D_x = 1,8$ (фрактальна розмірність) – збалансована структура.

Отримані показники підтверджують, що морфометричний аналіз може



служувати ефективним інструментом для оптимізації топології Smart Grid, підвищення її надійності, інтеграції відновлюваних джерел енергії та розроблення алгоритмів адаптивного керування потоками потужності.

Результати свідчать, що морфологічно збалансована Smart Grid забезпечує стійку роботу при зміні режимів генерації та споживання, а також мінімізує втрати під час розподілу енергії.

Отримані показники підтверджують, що морфометричний аналіз може слугувати ефективним інструментом для [1, 2, 4]:

- оптимізації топології Smart Grid;
- підвищення її надійності;
- інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ);
- розроблення алгоритмів адаптивного керування потоками потужності.

Морфометричний підхід дозволяє оцінювати якість просторової структури мережі, а не лише електричні параметри, що відкриває нові можливості для інтелектуального планування енергетичної інфраструктури.

Запропоновані в даній роботі морфометричні показники структури Smart Grid (щільність розподілених джерел енергії ρ , коефіцієнт збалансованості B , середня довжина енергетичного шляху L_a , індекс зв'язності C та фрактальна розмірність D_f) концептуально узгоджуються з морфометричним підходом до оцінки нерівномірності графіка електричного навантаження (ГЕН), розробленим раніше на основі аналізу діаграм радарного типу (ДРТ) [8].

У попередніх дослідженнях ГЕН трансформувався у замкнену фігуру на ДРТ, для якої розраховувалися такі морфометричні параметри, як округлість, компактність, видовження, випуклість та зміщення центра ваги. Ці показники дозволяли кількісно оцінити добову нерівномірність навантаження, чутливо реагуючи на наявність піків, провалів, симетрію та загальну форму графіка. Фактично йшлося про морфометрію часової форми процесу електроспоживання.

У цій статті аналогічні ідеї перенесено з часової області у просторово-топологічну. Показники ρ , B , L_a , C та D_f описують уже не форму добового графіка, а морфологію просторової структури Smart Grid: ступінь насиченості



території DER (аналог щільності та компактності), збалансованість генерації й споживання (аналог співвідношення «пік/провал»), середню «довжину шляху» в мережі (аналог видовження та компактності), рівень зв'язності й резервування (аналог випуклості й цілісності фігури), а також фрактальну складність конфігурації (ієрархічність та розгалуженість структури).

Таким чином, морфометричний підхід, раніше використаний для оцінки нерівномірності ГЕН у часі, в даній роботі розвинуто та узагальнено для аналізу просторово-структурних характеристик Smart Grid. Це забезпечує єдину методологічну основу для комплексного опису як часової, так і просторової нерівномірності децентралізованих енергетичних систем.

Висновки.

Досліджено застосування морфометричного аналізу для моделювання Smart Grid. Показники (ρ, B, L_a, C, D_f) дають кількісну характеристику просторової організації мережі.

На прикладі мікромережі доведено, що морфологічно оптимізована конфігурація забезпечує до 90% локального самозабезпечення та високий рівень енергоефективності.

Морфометричний підхід має значний потенціал для застосування у GIS-моделюванні, прогнозуванні розвитку енергетичних систем та плануванні інфраструктури Smart City [3, 5].

У роботі показано єдину логіку морфометричного аналізу часових (ГЕН) та просторових (Smart Grid) процесів. Обидва підходи базуються на перетворенні досліджуваного об'єкта у геометричну фігуру та оцінюванні її параметрів.

Показники Smart Grid (ρ, B, L_a, C, D_f) є просторовими аналогами морфометричних характеристик ГЕН (округлість, компактність, видовження, випуклість, зміщення центра ваги).

Морфометрія ГЕН характеризує нерівномірність споживання в часі, тоді як морфометрія Smart Grid — нерівномірність структури та енергопотоків у просторі.

Узагальнення морфометричного підходу дозволяє інтегрувати часові та



просторові моделі енергосистем у спільну методологічну платформу для аналізу та оптимізації їхньої роботи.

Морфометрія Smart Grid відкриває новий вимір дослідження енергетичних систем, дозволяючи оптимізувати розміщення DER, підвищувати стійкість, мінімізувати втрати та оцінювати топологічну вразливість мережі.

Література:

Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). *Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14(4), 944–980.

Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., et al. (2013). *A Survey on Smart Grid Technologies: Communication, Networks, and Cyber Security*. Computer Networks, 57(11), 3294–3320.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education.

Мартинюк, О. В., Ковальчук, А. С. (2021). *Інтелектуальні електричні мережі: принципи побудови та керування*. Науковий вісник НТУУ “КПІ”, Серія ЕЕ, №18.

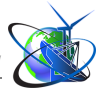
Хомутов, О. М. (2020). *Морфометричний підхід до моделювання структури енергомереж*. Енергетика та електрифікація, №4, 15–23.

Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., & Tipper, D. (2013). *A Survey on Cyber Security for Smart Grid Communications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14(4), 998–1010.

Hatziargyriou, N. (2020). *Microgrids: Architectures and Control*. Wiley-IEEE Press.

Komenda T., Komenda N., Vagapov Y. *Criteria of morphometric analysis of a daily load profile*. Int Trans Electr Energy Syst. Volume 29, Issue 5, May 2019. e2847. / URL: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.2847>

Abstract. *The article presents an improved approach to spatial modeling of Smart Grids based on the use of morphometric metrics to describe the geometry and topological characteristics of modern distributed energy networks. Unlike classical electrotechnical analysis methods, the morphometric approach considers the power system as a spatial structure and enables quantitative*



assessment of element density, degree of connectivity, compactness of power transmission routes, fractality of network contours, and spatial coherence between generation and consumption nodes. The proposed indicators (ρ , B , L_a , C , D_f) make it possible to formalize the morphology of the Smart Grid and evaluate its potential for self-regulation, resilience, and adaptation under variable load conditions. It is shown that spatial morphometric analysis is a structural analogue of load curve morphometry, providing a unified methodological basis for studying temporal and spatial non-uniformities. Using an urban microgrid as an example, it is demonstrated that optimization of morphological parameters contributes to reducing losses, increasing energy autonomy, and improving system reliability. It is concluded that morphological modeling opens new opportunities for Smart Grid configuration planning, DER integration, spatial optimization, and enhancing the efficiency of decentralized energy systems.

Keywords: Smart Grid, morphological modeling, spatial metrics, morphometric analysis, DER, energy efficiency.

Статтю надіслано:

© Коменда Н.В.