

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Роботу присвячено огляду сучасних підходів до підвищення енергоефективності розподілених систем водопостачання на основі динамічної сегментації мереж із застосуванням спектральної кластеризації графів. Проаналізовано методи формування зон обліку, алгоритми оптимального керування насосними станціями та регуляторами тиску, математичні моделі багатокритеріальної оптимізації, а також використання цифрових двійників і SCADA-систем. Узагальнено результати сучасних досліджень щодо зниження енергоспоживання та втрат води при інтеграції графових методів і алгоритмів оптимізації.

Ключові слова: система водопостачання, енергоефективність, спектральна кластеризація, графи, динамічна сегментація, оптимізація насосів, цифровий двійник.

Abstract

The work is devoted to a review of modern approaches to increasing the energy efficiency of distributed water supply systems based on dynamic network segmentation using spectral clustering of graphs. Methods for forming district metering zones, algorithms for optimal control of pumping stations and pressure regulators, mathematical models of multi-criteria optimization, as well as the use of digital twins and SCADA systems are analyzed. The results of modern research on reducing energy consumption and water losses when integrating graph methods and optimization algorithms are summarized.

Keywords: water supply system, energy efficiency, spectral clustering, graphs, dynamic segmentation, SCADA, pump optimization, digital twin.

Вступ

Підвищення енергоефективності систем водопостачання є одним із ключових напрямів модернізації інженерної інфраструктури. Значна частина енергоспоживання припадає на насосні станції, що обумовлює необхідність оптимізації їх режимів роботи. Додатковим чинником є втрати води, які залежать від рівня тиску та структури мережі.

Одним із поширених інструментів зниження втрат є поділ мережі на зони обліку (District Metered Areas, DMA), що дозволяє локалізувати витoki та регулювати тиск у межах окремих сегментів. Сучасні дослідження демонструють можливість автоматизованого формування DMA із використанням методів теорії графів та кластеризації.

Спектральна кластеризація та динамічне зонування мереж

Водопровідна мережа може бути представлена у вигляді зваженого графа, де вузли відповідають споживачам або гідравлічним вузлам, а ребра – трубопроводам. Спектральна кластеризація базується на аналізі власних значень та власних векторів лапласіана графа.

У роботі [1] подано загальну класифікацію методів підвищення надійності роботи розподілених систем водопостачання і запропоновано використання для підвищення ефективності їх роботи методу нечіткої логіки та генетичних алгоритмів. У роботі [2] запропоновано метод проектування DMA із застосуванням нормалізованої лапласіанматриці та алгоритму k-means із подальшою генетичною оптимізацією.

Запропонований підхід дозволив зменшити міжзональні зв'язки та покращити гідравлічну ізоляцію сегментів.

У роботі [3] запропоновано інтеграцію графових нейронних мереж із процедурою адаптивного формування DMA. За результатами моделювання забезпечено підвищення стабільності тиску та збереження працездатності мережі в аварійних сценаріях.

Оптимізація роботи насосів і регуляторів тиску

Оптимальне планування режимів роботи насосів є одним із найбільш досліджених напрямів енергозбереження.

У дослідженні [4] реалізовано генетичний алгоритм для одночасної оптимізації графіків роботи насосів і налаштувань регуляторів тиску. Зафіксовано зниження енергоспоживання та скорочення втрат води.

У роботі [5] запропоновано підхід на основі моделі прогнозного керування (Model Predictive Control) із врахуванням прогнозу попиту та тарифів на електроенергію. Результати експериментальної перевірки показали зниження операційних витрат порівняно з традиційним управлінням.

Математичні методи багатокритеріальної оптимізації

Задачі формування DMA та оптимізації режимів роботи мереж формалізуються як багатокритеріальні оптимізаційні задачі.

У роботі [6] запропоновано евристичну методику проектування DMA на основі теорії графів, що поєднує критерії гідравлічної ізоляції, зменшення втрат та мінімізації кількості контрольних пристроїв. Методика продемонструвала ефективність на тестових мережах середнього масштабу.

Цифрові двійники та системи моніторингу

Інтеграція SCADA-систем та гідравлічних моделей створює передумови для формування цифрових двійників водопровідних мереж.

У роботі [7] розроблено цифровий двійник на основі EPANET та генетичного алгоритму для виявлення витоків. Результати моделювання підтвердили можливість оперативної локалізації пошкоджень у реальному часі.

У дослідженні [8] продемонстровано застосування цифрового двійника для моніторингу та оптимізації міської мережі, що забезпечило підвищення ефективності управління за рахунок використання телеметричних даних.

Висновки

Огляд сучасних досліджень засвідчує, що підвищення енергоефективності розподілених систем водопостачання досягається шляхом поєднання спектральної кластеризації графів для формування DMA, динамічного зонування з використанням алгоритмів машинного навчання, оптимізації режимів роботи насосних станцій і регуляторів тиску, інтеграції цифрових двійників та систем моніторингу.

Комплексне застосування зазначених підходів створює основу для формування адаптивних та енергоефективних систем водопостачання різного масштабу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрій Ткачук, Микола Мошноріз. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ. (2024). Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 333(2), 428-432. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2-67>. URL: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/174>.
2. Di Nardo A., Di Natale M., Giudicianni C., Greco R., Santonastaso G.F. Weighted spectral clustering for water distribution network partitioning [Electronic resource] / Di Nardo et al. // Applied Network Science. – 2017. – Vol 2, no. 19. – Mode of access: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41109-017-0033-4> (date of access: 16.02.2026)

3. Fang Q., Zhao H., Xie C., Chen T. A method for water supply network DMA partitioning planning based on improved spectral clustering [Electronic resource] / Q. Fang, H. Zhao, C. Xie, T. Chen // *Water Supply*. – 2023. – Vol. 23, no. 8. – P. 3432–3452. – Mode of access: <https://doi.org/10.2166/ws.2023.180> (date of access: 16.02.2026).
4. Giudicianni C., Herrera M., di Nardo A., Adeyeye K. Automatic multiscale approach for water networks partitioning into dynamic district metered areas [Electronic resource] / C. Giudicianni, M. Herrera, A. di Nardo, K. Adeyeye // *arXiv*. – 2019. – abs/1905.03372. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1905.03372> (date of access: 16.02.2026).
5. Duan, B., Gao, J., Cao, H., Hu, S. Energy-Efficient Management of Urban Water Distribution Networks Under Hydraulic Anomalies: A Review of Technologies and Challenges [Electronic resource] // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, 2877. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/11/2877> (date of access: 16.02.2026).
6. Wang Y., Yok K. T., Wu W., Simpson A., Weyer E., Manzie C. Minimizing pumping energy cost in real-time operations of water distribution systems using economic model predictive control [Electronic resource] / Y. Wang, K. T. Yok, W. Wu, A. Simpson, E. Weyer, C. Manzie // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2021. Vol. 147, no. 7. – Mode of access: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001399](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001399) (date of access: 16.02.2026).
7. Ramos H.M., Kuriqi A.; Besharat M.; Creaco E.; Tasca E. Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks [Electronic resource] // *Water*. – 2023. – Vol. 15, no. 6. – 1129. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/6/1129> (date of access: 16.02.2026).
8. Bonilla, C.A.; Zanfei, A.; Brentan, B.; Montalvo, I.; Izquierdo, J. A Digital Twin of a Water Distribution System by Using Graph Convolutional Networks for Pump Speed-Based State Estimation [Electronic resource] / *Water*. – 2022. – Vol. 14, no. 4. – 514. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/w14040514> (date of access: 16.02.2026).

Дудченко Богдан Ігорович – аспірант G3-25а, кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: bogdan.loljoj@gmail.com.

Науковий керівник: **Мошноріз Микола Миколайович** – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: moshnoriz@gmail.com.

Dudchenko Bohdan Ihorovich – postgraduate student G3-25a, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogdan.loljoj@gmail.com.

Supervisor: **Moshnoriz Mykola Mykolaiovych** – Cand. Sc. (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: moshnoriz@gmail.com.