

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглядається проблематика енергетичної ефективності розподілених систем водопостачання. Проаналізовано недоліки традиційних методів регулювання тиску за допомогою дросельних клапанів. Обґрунтовано доцільність впровадження технологій рекуперації гідравлічної енергії, зокрема використання стандартизованих насосів у турбінному режимі (Pump as Turbine – PAT). Наведено огляд сучасних стратегій керування рекупераційними комплексами в умовах динамічної зміни витрат води.

Ключові слова: система водопостачання, енергоефективність, оптимізація насосів, насоси у режимі турбіни.

Abstract

The paper considers the issue of energy efficiency of distributed water supply systems. The shortcomings of traditional methods of pressure regulation using throttle valves are analyzed. The feasibility of implementing hydraulic energy recovery technologies is substantiated, in particular, the use of standardized pumps in turbine mode (Pump as Turbine – PAT). An overview of modern strategies for controlling recuperation complexes in conditions of dynamic changes in water flow is provided.

Keywords: water supply system, energy efficiency, pump optimization, pump as turbine.

Вступ

Сучасні муніципальні системи водопостачання є складними інженерними комплексами, експлуатація яких супроводжується значними витратами електричної енергії. Основна частка цих витрат припадає на роботу насосних станцій. При цьому, у розподільчій мережі часто виникає проблема надлишкового гідравлічного напору. Це явище характерне для міст зі складним рельєфом (де вода подається з висотних резервуарів у низинні райони), а також для зон мережі, що знаходяться близько до нагнітальних насосних станцій.

Надлишковий тиск у РСВ не лише є ознакою нераціонального використання енергії, але й виступає головним фактором збільшення аварійності: поривів трубопроводів, зносу арматури та зростання обсягів прихованих витоків води. Тому контроль та оптимізація тиску є першочерговим завданням для операторів водоканалів [1].

Традиційні підходи до регулювання тиску та їхні недоліки

Історично для зниження напору до нормативних значень застосовуються клапани пониження тиску (Pressure Reducing Valves – PRV). Він автоматично відкривається, коли тиск у трубопроводі перевищує задане значення, і випускає частину води, щоб запобігти пошкодженню мережі.

Незважаючи на відносну простоту та надійність PRV, з позицій розсіювання потенційної енергії потоку, є економічно недоцільним. Трансформація цих вузлів гасіння енергії на вузли її генерації відкриває шлях до створення так званих "розумних водних мереж" (Smart Water Grids).

Технологічні рішення для рекуперації: концепція PAT

Використання гідроенергетичного потенціалу в розподілених системах водопостачання вимагає специфічного підходу до вибору обладнання. Оскільки РСВ проектувалися для транспортування води, а не для генерації енергії, використання традиційних гідротурбін пов'язане з низкою перешкод: висока вартість, складність монтажу в обмеженому просторі насосних станцій та тривалий термін окупності. На фоні цього концепція PAT (Pump as Turbine) виглядає найбільш раціональним рішенням [2].

Якщо подати потік води під високим тиском на вихідний патрубок звичайного відцентрового насоса, робоче колесо почне обертатися у зворотному напрямку. В результаті цього кінетична енергія води перетвориться на механічну енергію валу насоса. При підключенні валу до асинхронного двигуна, який у такому режимі починає працювати як генератор, ми отримуємо мікро-ГЕС.

Дослідження актуальних напрямків підкреслюють кілька причин домінування РАТ у сфері рекуперації в РСВ:

- Вартість РАТ становить лише частку вартості спеціалізованої мікротурбіни. Це дозволяє впроваджувати проекти рекуперації навіть на невеликих вузлах мережі, де термін окупності дорогих турбін перевищував би життєвий цикл обладнання.
- Насоси вже мають стандартизовані з'єднання та габарити, що ідеально підходять для існуючої інфраструктури водоканалів. Їх легше інтегрувати в обхідні лінії паралельно з існуючою регулюючою арматурою.
- Персонал водоканалів вже має досвід обслуговування насосного обладнання. Рекупераційний вузол на базі РАТ не потребує специфічних знань щодо конструкції гідротурбін, що критично для надійності аварійних систем.

Виклики експлуатації в умовах динамічної РСВ

Попри очевидні переваги, використання насоса як турбіни являє складну задачу. Одна з головних проблем полягає в тому, що насоси проєктуються не для турбінного режиму. Робочі характеристики насоса в турбінному режимі суттєво відрізняються від насосного режиму. Наприклад, для отримання однакової потужності в турбінному режимі зазвичай потрібні більші значення напору та витрати води.

Також класичні турбіни мають напрямні лопатки, що змінюють кут атаки, адаптуючись до потоку. РАТ мають жорстку геометрію. Це означає, що вони ефективні лише у вузькому діапазоні експлуатаційних умов. Тому у разі застосування РАТ необхідно підлаштовувати гідравлічну характеристику агрегату під стан мережі в реальному часі. На відміну від традиційних ГЕС, де потік води є відносно стабільним, витрата води у комунальній мережі постійно змінюється протягом доби залежно від поведінки споживачів. Відповідно, змінюється і доступний для рекуперації перепад тисків [3, 4].

Для вирішення цієї проблеми сучасні дослідження фокусуються на трьох схемах регулювання:

- Гідравлічне регулювання: використання обвідних ліній із засувками, що дозволяють пропускати надлишкову витрату повз турбіну в години пікового споживання, захищаючи РАТ від перевантажень.
- Електричне регулювання: використання частотно-регульованих приводів у реверсивному режимі генерації. Зміна частоти обертання валу дозволяє зміщувати криву характеристик РАТ, адаптуючи її до поточних гідравлічних умов мережі та максимізуючи виробіток енергії.
- Комбіноване регулювання: комбінація обох методів, що забезпечує найвищий рівень гнучкості, однак вимагає впровадження складних алгоритмів керування на базі програмованих логічних контролерів (PLC).

Економічна доцільність та екологічний ефект

Впровадження систем рекуперації дозволяє водоканалам частково компенсувати витрати на купівлю електроенергії з мережі. Згенерована енергія може використовуватися для автономного живлення датчиків телеметрії (SCADA), засувки з електроприводом, систем хлорування або передаватися в загальну енергомережу. Окрім прямого економічного ефекту, зниження тиску в системі пропорційно зменшує обсяги витоків води, що скорочує витрати на її попереднє очищення та транспортування. Екологічний ефект полягає у зменшенні вуглецевого сліду (скорочення викидів парникових газів), що відповідає критеріям сталого розвитку міських територій [5].

Висновки

Технологія рекуперації енергії у водопровідних мережах за допомогою РАТ є доведеним та ефективним інструментом підвищення енергоефективності комунального господарства. У роботі розглянуто проблематику енергетичної ефективності розподілених систем водопостачання. Проаналізовано недоліки традиційних методів регулювання тиску за допомогою дросельних клапанів. Обґрунтовано доцільність впровадження технологій рекуперації гідравлічної енергії, зокрема використання стандартизованих

насосів у турбінному режимі (Pump as Turbine – PAT). Наведено огляд сучасних стратегій керування рекупераційними комплексами в умовах динамічної зміни витрат води.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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. *Energies*. 2025. Vol. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/en18112877> (date of access: 15.03.2026).
2. Giudicianni C., Mitrovic D., Wu W., Ferrarese G., Pugliese F., Fernández-García I., Campisano A. et al. Energy recovery strategies in water distribution networks: Literature review and future directions in the net-zero transition. *Urban Water Journal*. 2024. Vol. 21, no. 10. P. 1185-1200. URL: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2212271> (date of access: 15.03.2026).
3. Nasir A., Dribssa E., Girma M. The pump as a turbine: A review on performance prediction, performance improvement, and economic analysis Processes. *Heliyon*. 2023. Vol. 10, no. 4. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26084> (date of access: 15.03.2026).
4. Eskandaripour M., Moeini R., Dehnavi A., Bateni S. M. Pressure management and energy production approaches in urban water distribution networks using pumps as turbines. *Energy Reports*. 2025. Vol. 14. P. 2593–2606. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.09.034> (date of access: 15.03.2026).
5. Manservigi L., Venturini M., Losi E., Castorino G. A. M. Optimal selection and operation of pumps as turbines in water distribution networks. *Water*. 2023. Vol. 15, no. 23. URL: <https://doi.org/10.3390/w15234123> (date of access: 15.03.2026).

Дудченко Богдан Ігорович – аспірант G3-25a, 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 Ihorovych – 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.