

УДК 681.5:622.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/40>**Савицький О.І.**<https://orcid.org/0000-0002-8904-1807>

Криворізький національний університет

Харламенко В.Ю.<https://orcid.org/0000-0002-4008-5518>

Криворізький національний університет

Тимохін Є.В.<https://orcid.org/0009-0003-0821-584X>

Криворізький національний університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ОБОРОТНИМ ВОДОПОСТАЧАННЯМ СЕКЦІЇ ЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ

У статті розглянуто проблему підвищення ефективності оборотного водопостачання збагачувальних фабрик гірничо-збагачувальних комбінатів в умовах змінного технологічного навантаження. Показано, що традиційні детерміновані системи керування насосними станціями не забезпечують стабільного балансу води та призводять до перевитрат енергетичних ресурсів і прискореного зношування обладнання. Обґрунтовано доцільність застосування інтелектуальних методів керування, зокрема нечіткої логіки, для адаптації системи водопостачання до нестаціонарних режимів роботи секції збагачення.

Об'єктом дослідження є секція збагачувальної фабрики з повним набором механізмів мокрого збагачення, що споживають технологічну воду. Предметом дослідження є процес керування подачею оборотної води шляхом узгодження продуктивності насосної станції з фактичними потребами споживачів. Запропоновано структуру інтелектуальної системи автоматичного керування, яка включає модель водного балансу секції та нечіткий регулятор подачі води. Сформовано базу нечітких правил, що враховує співвідношення тверде-рідке, зміну продуктивності механізмів та рівні в технологічних ємностях.

Результати моделювання підтверджують можливість зменшення коливань витрати води, зниження питомого енергоспоживання насосної станції та підвищення стабільності технологічного процесу збагачення. Запропонований підхід може бути використаний при модернізації існуючих систем водопостачання гірничо-збагачувальних підприємств.

Ключові слова: оборотне водопостачання, збагачувальна фабрика, нечітке керування, насосна станція, енергоефективність.

Постановка проблеми. Збагачувальні фабрики гірничо-збагачувальних комбінатів належать до найбільших промислових споживачів води [1, 2]. Більшість технологічних операцій збагачення корисних копалин здійснюється із застосуванням мокрих методів, що зумовлює необхідність безперервної подачі значних обсягів технічної води. З метою зменшення забору води з природних джерел на підприємствах широко застосовуються оборотні системи водопостачання [3].

Разом з тим, сучасні оборотні системи характеризуються високою інерційністю, змінним наванта-

женням і значною кількістю збурюючих факторів, пов'язаних з нерівномірною роботою технологічних механізмів. Традиційні системи керування насосними станціями, побудовані на основі детермінованих алгоритмів, не забезпечують ефективної адаптації до таких умов, що призводить до перевитрат води та електроенергії [4–6].

Таким чином, актуальною є задача розробки інтелектуальних систем керування, здатних забезпечити підтримку балансу води в умовах нестаціонарних режимів роботи збагачувальних секцій [9–12].



Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам оптимізації систем промислового водопостачання, енергозбереження та автоматизації насосних станцій присвячено значну кількість наукових робіт. У класичних дослідженнях основна увага зосереджена на розрахунку водного балансу підприємств, проектуванні оборотних систем та підвищенні їх надійності [1, 2]. У роботах зазначається, що впровадження оборотних і замкнених систем дозволяє зменшити споживання свіжої води на 60–90% залежно від типу виробництва [3].

Значний масив досліджень присвячено підвищенню енергоефективності насосних агрегатів за рахунок частотного регулювання електроприводів, оптимізації режимів роботи та узгодження характеристик насосів з гідравлічною мережею [4, 5]. Показано, що застосування перетворювачів частоти дозволяє знизити енергоспоживання на 15–30% у порівнянні з дросельним регулюванням [6]. Разом з тим, більшість таких систем орієнтовані на стабільні режими роботи і не враховують змінний характер водоспоживання технологічних секцій збагачувальних фабрик.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням систем активного регулювання продуктивності насосних станцій із рекуперацією енергії, де регулювання витрати здійснюється за рахунок зміни гідравлічного опору мережі або використання гідротурбін [7, 8]. Незважаючи на високу енергетичну ефективність таких рішень, їх практичне впровадження обмежене складністю систем керування та високою вартістю обладнання.

У сучасних публікаціях дедалі більшого поширення набувають інтелектуальні методи керування технологічними процесами, зокрема нечітка логіка, нейронні мережі та гібридні алгоритми [9, 10]. Перевагою таких підходів є можливість ефективного керування об'єктами зі складною динамікою та неповною інформацією про стан системи. Нечіткі регулятори успішно застосовуються у водопостачанні, енергетиці та хімічних технологіях, однак їх використання для керування оборотним водопостачанням збагачувальних фабрик залишається обмеженим [11, 12].

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що існуючі рішення не забезпечують комплексного підходу до керування балансом води секції збагачення з урахуванням змінного навантаження технологічних механізмів. Це обумовлює необхідність розробки інтелектуальної системи керування, що поєднає модель

водного балансу з адаптивним алгоритмом прийняття рішень.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження можливості підвищення ефективності оборотного водопостачання секції збагачувальної фабрики шляхом розробки інтелектуальної системи автоматичного керування подачею води на основі нечіткої логіки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати водний баланс секції збагачення;
- сформувати структуру інтелектуальної системи керування;
- розробити нечіткий регулятор подачі води;
- дослідити ефективність запропонованої системи методом моделювання.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є секція збагачувальної фабрики гірничо-збагачувального комбінату, що включає млини, класифікатори, гідроциклони, магнітні сепаратори, дешаматори та насосні агрегати, які споживають оборотну технічну воду [1–3]. Предметом дослідження є процес керування подачею оборотної води на технологічні механізми секції з урахуванням змінного навантаження та нестаціонарного режиму роботи [11, 12].

Запропонована інтелектуальна система автоматичного керування (ІСАК) оборотним водопостачанням секції збагачувальної фабрики призначена для узгодження фактичної подачі технічної води з реальними потребами технологічних споживачів у режимі реального часу [11, 12]. Система побудована за багаторівневою ієрархічною структурою та поєднає класичні контури вимірювання з інтелектуальним рівнем прийняття рішень.

На нижньому рівні ІСАК розташовані первинні засоби вимірювання: датчики витрати, напору та рівнів у технологічних ємностях, що формують інформаційну основу для оцінювання поточного стану водного балансу секції [1–3].

Середній рівень системи представлений математичною моделлю водного балансу секції збагачення, яка описує розподіл потоків води між основними технологічними механізмами [1, 2].

Верхній рівень ІСАК реалізує інтелектуальне керування на основі нечіткої логіки, що дозволяє адаптувати систему до нестаціонарних режимів роботи без точного математичного опису всіх процесів [9–12].

Для синтезу інтелектуальної системи керування необхідно формалізувати основні закономірності розподілу потоків води у секції збагачувальної

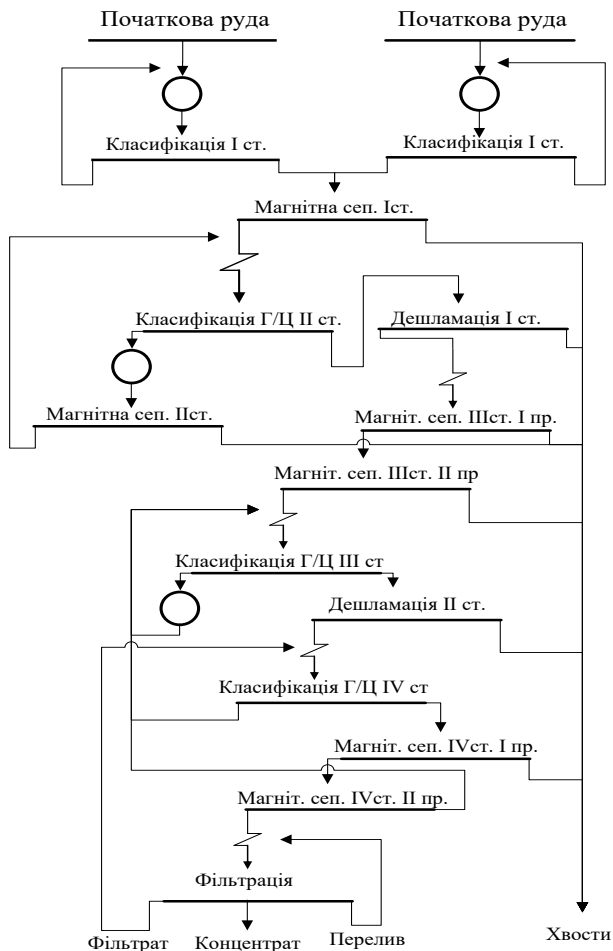


Рис. 1. Структура об'єкта дослідження

фабрики. Математичне моделювання процесу водопостачання виконано на основі рівнянь балансу маси, які широко застосовуються при аналізі промислових систем водокористування [1–3].

Загальний баланс води секції збагачення може бути поданий у вигляді:

$$Q_{\text{подачі}}(t) = Q_{\text{спож}}(t) + Q_{\text{втрат}}(t) + dV(t)/dt,$$

де $Q_{\text{подачі}}(t)$ – сумарна витрата води, що подається насосною станцією; $Q_{\text{спож}}(t)$ – сумарна витрата води, споживана технологічними механізмами; $Q_{\text{втрат}}(t)$ – безповоротні втрати води; $V(t)$ – об'єм води в технологічних ємностях секції [1–3].

Співвідношення тверде-рідке є критичним параметром процесу збагачення і широко використовується у технологічних моделях [1, 2]:

$$KTR(t) = G_T(t) / Q_{\text{спож}}(t),$$

де $KTR(t)$ – поточне співвідношення твердої та рідкої фаз у пульпі; $G_T(t)$ – масова витрата твердої фази, що надходить у секцію збагачення; $Q_{\text{спож}}(t)$ – сумарна витрата технологічної води, що споживається механізмами секції.

Динаміка насосних агрегатів описується моделями першого порядку, що застосовуються при аналізі систем із частотним регулюванням [4–6]:

$$T_n \cdot dQ_{\text{подачі}}(t)/dt + Q_{\text{подачі}}(t) = K_n \cdot u(t),$$

де T_n – стала часу насосної станції, що характеризує її інерційність; $Q_{\text{подачі}}(t)$ – миттєва витрата води, що подається насосною станцією; K_n – коефіцієнт підсилення, який визначає зміну продуктивності при зміні керуючого сигналу; $u(t)$ – керуючий вплив, сформований інтелектуальним регулятором.

Формування керуючого впливу на основі нечіткої логіки відповідає класичним підходам теорії нечітких систем керування:

$$u(t) = F\{x_1(t), x_2(t), x_3(t)\},$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал, що визначає зміну режиму роботи насосної станції; $F\{\cdot\}$ – оператор нечіткого логічного виводу; $x_1(t)$ – відхилення співвідношення тверде-рідке від заданого значення; $x_2(t)$ – швидкість зміни сумарної витрати води технологічними механізмами; $x_3(t)$ – відхилення рівня води у технологічній ємності від заданого значення.

Запропонована модель є основою для імітаційного дослідження ефективності системи керування [11, 12].

Для формалізації мети керування та підвищення наукової обґрунтованості алгоритму введено узагальнений критерій оптимальності, який відображає вимоги до якості технологічного процесу та енергоефективності системи водопостачання. Цільова функція керування визначається у вигляді:

$$J = \int [\alpha \cdot (KTR(t) - KTR_{\text{зад}})^2 + \beta \cdot (dQ_{\text{спож}}(t)/dt)^2 + \gamma \cdot P_n(t)] dt,$$

де J – інтегральний критерій якості керування; $KTR(t)$ – поточне співвідношення тверде-рідке; $KTR_{\text{зад}}$ – задане значення співвідношення; $Q_{\text{спож}}(t)$ – сумарна витрата технологічної води; $P_n(t)$ – потужність, споживана насосною станцією; α, β, γ – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритети стабільності технологічного процесу та енергозбереження.

Запропонований нечіткий регулятор реалізує мінімізацію функціоналу J у непрямій формі шляхом адаптивної зміни керуючого впливу залежно від поточного стану системи. Такий підхід дозволяє поєднати переваги оптимального керування з робастністю нечітких алгоритмів у умовах неповної та неточної інформації про об'єкт керування.

Для оцінювання ефективності запропонованої інтелектуальної системи керування було проведено імітаційне моделювання процесу водопостачання секції збагачувальної фабрики відповідно до методів, рекомендованих для аналізу складних технічних систем [6–8, 11].

Моделювання виконувалося для типових режимів роботи секції: номінального, перевантаження та недовантаження. У кожному сценарії порівнювалися показники традиційної системи керування та інтелектуальної системи на основі нечіткої логіки [9–12].

Отримані результати підтвердили зменшення коливань витрати води, стабілізацію технологічних параметрів та зниження питомого енергоспоживання насосної станції, що узгоджується з результатами аналогічних досліджень у промислових системах водопостачання [6–8].

Висновки. У результаті проведених досліджень запропоновано інтелектуальну систему автоматичного керування оборотним водопостачанням секції збагачувальної фабрики, що забезпечує узгодження подачі технічної води з фактичними потребами технологічних споживачів у режимі реального часу.

1. Запропоновано ієрархічну структуру інтелектуальної системи керування, яка поєднує класичні контури вимірювання з нечітким рівнем

прийняття рішень та враховує особливості нестаціонарної роботи збагачувальних секцій.

2. Розроблено математичну модель водного балансу секції збагачення, що дозволяє формалізувати розподіл потоків води між технологічними механізмами та використовувати її як основу для синтезу алгоритмів керування.

3. Синтезовано нечіткий регулятор подачі води, який забезпечує підтримання співвідношення тверде-рідке у допустимих межах при змінному навантаженні та неповній інформації про стан об'єкта.

4. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що використання запропонованої системи дозволяє зменшити коливання витрати води, підвищити стабільність технологічних параметрів та знизити питомі витрати електроенергії насосною станцією на 8–12% у порівнянні з традиційними системами керування.

5. Запропонований підхід може бути використаний для модернізації існуючих систем водопостачання гірничо-збагачувальних підприємств без необхідності суттєвої реконструкції обладнання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію розробленої системи з SCADA-рівнем підприємства, розширення моделі з урахуванням якості оборотної води та створення цифрового двійника системи промислового водопостачання.

Список літератури:

1. Wurbs R.A. *Water Resources Engineering*. Prentice Hall, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814886-3.00001-1>.
2. Mays L.W. *Water Resources Engineering*. Wiley, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119300762>.
3. Wang L., Yang J. Industrial water reuse and recycling systems. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120493>.
4. Karassik I.J., Messina J.P. *Pump Handbook*. McGraw-Hill, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1036/9780071627553>.
5. Stepanoff A.J. *Centrifugal and Axial Flow Pumps*. Wiley, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470171578>.
6. Saidur R. Energy savings in pumping systems using variable frequency drives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.033>.
7. Ramos H.M., Borga A., Simão M. Energy recovery in water systems by micro-hydropower. *Water*. 2019. Vol. 11(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/w11040838>.
8. Pérez-Sánchez M., Sánchez-Romero F.J. Energy efficiency in pressurized water networks. *Water Resources Management*. 2021. Vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02843-4>.
9. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
10. Ross T.J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Wiley, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119235842>.
11. Pérez R., López A. Fuzzy control of water distribution systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2020. Vol. 92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103675>.
12. Khatibi M., Javan M. Intelligent control of industrial water supply systems. *ISA Transactions*. 2021. Vol. 112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.01.012>.

Savytskyi O.I., Kharlamenko V.Yu., Tymokhin Ye.V. INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR RECIRCULATING WATER SUPPLY OF A MINERAL PROCESSING PLANT SECTION

The paper addresses the problem of improving the efficiency and stability of recirculating water supply systems at mineral processing plants operating under variable technological loads. Beneficiation sections are characterized by a large number of water-consuming mechanisms, uneven equipment operation, and significant disturbances that affect the water balance and energy consumption of pump stations. Conventional deterministic control systems based on fixed setpoints or classical PID controllers are unable to adequately adapt to such conditions, which results in excessive water and electricity consumption and accelerated equipment wear.

The object of the study is a beneficiation section of a mining and processing plant that includes ball mills, classifiers, hydrocyclones, magnetic separators, desliming units, sumps, and centrifugal pumps. The subject of the research is the process of controlling the supply of recirculating technological water by coordinating pump station productivity with the actual water demand of technological consumers. Particular attention is given to maintaining a stable solid-to-liquid ratio, which directly influences the efficiency of mineral separation processes.

To solve this problem, an intelligent automatic control system based on fuzzy logic is proposed. The system includes a water balance model of the beneficiation section, a fuzzy inference module, and a control unit for the pump station. Input variables of the fuzzy controller include deviations of the solid-to-liquid ratio, changes in water consumption, and variations in water levels in technological tanks. The output variable is a corrective control action that adjusts the pump station operating mode in real time under conditions of incomplete and uncertain information.

Simulation modeling was carried out for nominal, overload, and underload operating scenarios. The results demonstrate reduced water flow oscillations, improved stability of technological parameters, and lower specific energy consumption of the pump station compared to conventional control methods. The proposed approach can be used for modernization of existing industrial water supply systems and forms a basis for further development of adaptive and digital water management solutions.

Keywords: *recirculating water supply, mineral processing plant, fuzzy control, pump station, water balance, energy efficiency.*

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026