

УДК 628.3:621.3

КАПЛУН В.В., ШТЕПА В.М., КОТ Р.Є.

Київський національний університет технологій та дизайну

## УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДООЧИСТКИ НА ОСНОВІ КРИТЕРІЮ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

**Мета.** Удосконалення процесів функціонування електротехнологічних систем очистки стічних вод промислових об'єктів у відповідності до вимог екологічної безпеки та раціонального використання енергетичних ресурсів.

**Методика.** На основі сучасних методів водоочистки промислових об'єктів запропоноване інтелектуальне управління видаленням забруднювачів із стоків шляхом синтезу алгоритмів управління та реалізації об'єктно-орієнтованих технологічних регламентів функціонування комбінованих електротехнологічних систем водоочистки з урахуванням вимог екологічної безпеки та зменшення рівнів енергоспоживання.

**Результати.** У роботі обґрунтовано та практично реалізовані об'єктно-орієнтовані технологічні регламенти комбінованих електротехнологічних систем водоочистки промислових об'єктів.

**Наукова новизна.** Набув подальшого розвитку метод синтезу алгоритмів керування та розроблення об'єктно-орієнтованих технологічних регламентів комбінованих електротехнологічних систем водоочистки промислових об'єктів підвищеної енергоефективності із врахуванням дії нештатних ситуацій техногенного і природного походження.

**Практична значимість.** На основі спеціалізованого програмного забезпечення розроблені алгоритми керування електротехнологічними установками водочистки, запропоновані об'єктно-орієнтовані технологічні регламенти управління функціонуванням комбінованими електротехнологічними системами очистки стічних вод промислових об'єктів для зменшення електроспоживання.

**Ключові слова:** водоочистка промислових об'єктів, екологічна безпека, об'єктно-орієнтовані технологічні регламенти, алгоритми управління, енергоефективність.

**Вступ.** Експлуатаційний контроль технологічних параметрів, обслуговування та ремонт очисних споруд на реальних промислових об'єктах проводиться у відповідності до чинних галузевих та внутрішніх нормативних документів та СНіП 2.04.03 – 85. Очевидно, що при створенні споруд водоочистки на кожному конкретному підприємстві розробляються технологічні регламенти (ТР), які базуються на виконанні проектних норм і вимог. При цьому використання техніко-технологічних рішень для забезпечення процесів водоочистки повинно забезпечувати конкретні обґрунтовані технологічні режими функціонування таких систем і відповідати вимогам екологічної безпеки та якості водоочистки [1, 2]. Одним з завдань при формуванні ресурсного забезпечення функціонування систем промислової водоочистки є встановлення взаємозв'язку між рівнями енергоспоживання та якістю очистки води.

**Постановка завдання.** Розроблення ТР відповідного водоочисного обладнання базується на чинному водному паспорті підприємства [3]. Розроблення регламентних документів, як універсальних рішень, повинно враховувати постійні, тимчасові, разові ТР та особливості функціонування конкретного обладнання, яке встановлюється на підприємствах. Варто зауважити, що людино-машинна система поєднує в собі групи фахівців: розробники ТР, технічний персонал з експлуатації, керівник підприємства, державні контролюючі органи. Крім них є відповідні «зовнішні системи»: інформаційно-функціональні моделі (ІФМ) та інформаційно-вимірювальний комплекс робочої міри комбінованої електротехнологічної водоочистки (РМКЕВ).

Варто зазначити, що нештатні ситуації (НС) в контексті функціонування промислових систем водоочистки визначаються як технологічний процес чи стан обладнання, які виходять за рамки паспортних режимів функціонування, що, в свою чергу, може призвести до перевищення допустимих концентрацій забруднювачів чи припинення водоочистки, або нераціонального використання енергоносіїв. Створення енергоефективних систем водоочистки можливе шляхом використання базового обладнання комбінованих електротехнологій водоочистки та інтелектуального управління із врахуванням дії нештатних ситуацій техногенного чи природного походження.

**Результати досліджень.** Розроблення ТР комбінованої електротехнологічної очистки стічних вод промислових об'єктів базується на використанні відомих базових методів [3] з урахуванням технологічної схеми та режимів усунення дії потенційних нештатних ситуацій природного і техногенного характеру, номенклатури та режимів функціонування водоочисного обладнання на основі комплексного врахування ефективності інвестицій, зокрема і рівнів енергоефективності (рис. 1).

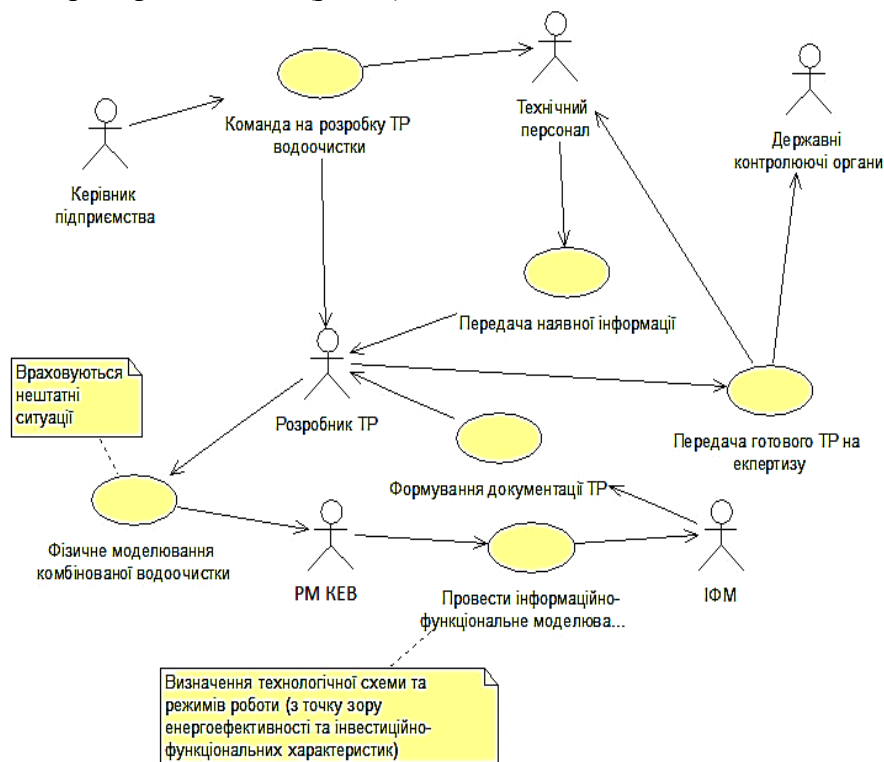


Рис. 1. Структурно-логічна схема створення ТР комбінованої електротехнологічної очистки стічних вод промислових об'єктів (нотації UML)

При цьому таке врахування НС повинно виконуватись об'єктно-орієнтовно. Для забезпечення подальшої адекватності функціонування реальних систем, дію нештатних ситуацій пропонується імітувати під час налаштування обладнання водоочистки, а саме:

- при створенні модельних розчинів перед опрацюванням води із використанням РМКЕВ – шляхом додавання забруднювачів із перевищенням показників, котрі зафіксовано у водному паспорті конкретного підприємства;
- при формуванні бази знань для синтезу нейромережі імітаційного моделювання (МЗМКЕВ).

Тоді об'єктно-орієнтована логічна послідовність удосконаленого методу синтезу ТР матиме вигляд (рис. 2).

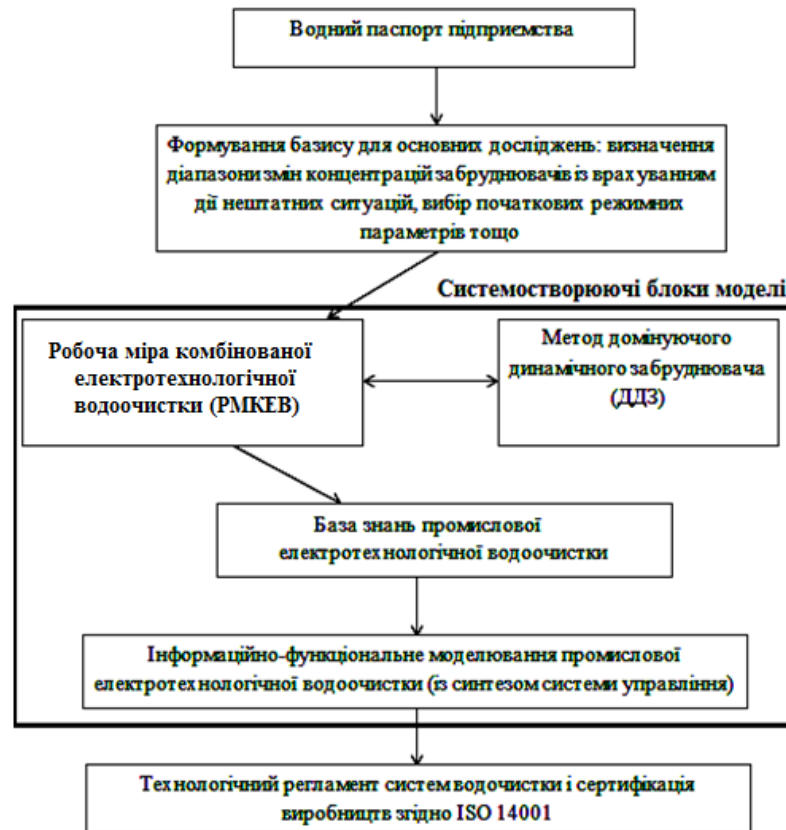


Рис. 2. Логічна модель синтезу ТР промислової електротехнологічної водоочистки на основі вимірювальної інформації із врахуванням дії нештатних ситуацій

Аналіз логічної моделі (рис. 2) вказує, що ключовим для створення ТР є розробка комплексного критерію для оцінювання ефективності функціонування електротехнологічних засобів водоочистки, як одного з найбільш ресурсовитратного процесу [4].

Згідно положень СНіП 2.04.03 – 85, технічну ефективність (Р) розраховують за формулою:

$$P = \frac{(C_{вх} - C_{вих})}{C_{вх}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$C_{вх}$  – значення показника якості води, яка надходять на очистку,  $C_{вих}$  – концентрація забруднювачів після очистки.

Однак, такий підхід щодо визначення ефективності враховує тільки екологічну складову. Експлуатаційні чинники, які характеризують функціонування технологічного обладнання, не враховуються. З огляду на міркування, викладені в [4], стає очевидним, що забезпечення заданого рівня очистки води може бути реалізоване з різними витратами енергоресурсів. Тільки комплексне оцінювання ефективності функціонування технологічного обладнання очистки води дозволить знайти границі ефективного використання енергоресурсів. На основі проведених теоретичних досліджень та експериментальних випробувань [2,3,4], запропонований вираз для визначення базового критерію енергоефективності:

$$EF_y = \frac{\left[ \left( \frac{L1_{вих} - L1_{зад}}{L1_{зад}} \cdot 100\% \right) + \dots + \left( \frac{LN_{вих} - LN_{зад}}{LN_{зад}} \cdot 100\% \right) \right] \cdot \sum_{i=1}^N Q_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \%/\text{кВт}, \quad (2)$$

де  $L_{вих}$  – фактичне значення відповідного параметра оцінки якості водоочистки;  $L_{зад}$  – задане (нормативне) значення відповідного параметра оцінки якості водоочистки;  $Q$  – час роботи обладнання, год;  $W$  – кількість електроенергії, спожитої електротехнологічним обладнанням водоочистки, кВт-год;  $N$  – кількість параметрів оцінювання якості водоочистки (як правило, відповідають кількості установок, які використовуються діяні у процесі водоочистки).

Технологічно завдання управління комбінованою системою водоочистки полягає у підтриманні значення критерію енергоефективності (2) близьким до нуля: якщо  $EF_y > 0$ , то очистка неякісна, якщо  $EF_y < 0$  – то використання енергетичних ресурсів не ефективне.

Розроблено архітектуру системи управління із адаптивним корегуванням стратегій управління у режимі реального часу з можливістю прийняття рішень в умовах дії збурень природного та техногенного походження з урахуванням критерію енергоефективності (2). До узагальненої системи входять: локальна система управління; підсистема прийняття рішень з блоком фільтрації вхідного сигналу (підсистема прийняття рішень містить блок адаптивного формування стратегій управління у режимі реального часу на основі самоорганізованих карт Кохонена).

Система управління електротехнологічним обладнанням для водоочистки та водопідготовки складається із: підсистеми прийняття рішень 1, яка включає блок фільтрації вхідного сигналу 2, блок нейромережевого коригування концептів нечітких когнітивних карт (НКК) 3; блок прийняття рішень 4, блок адаптивного формування у режимі реального часу стратегій управління 5, блок управління 6; локальної системи управління 7, що складається з локального автоматичного управляючого пристрою 8, виконавчих елементів 9 (електролізери, насоси, вакуум-насоси, клапана, нагрівачі, компресори тощо), об'єкта управління 10 (рис. 3). У якості керуючих пристроїв для реалізації інструментального інформаційно-вимірювального комплексу комбінованої електротехнологічної водоочистки обрані мікроконтролер класу ПЛК ICP DAS i-8417 (верхній рівень), мікроконтролер ATmega128-16AU (нижній рівень) [6]. Для таких технічних засобів автоматики розроблено програмне забезпечення на мові програмування C++ з використанням бібліотеки QT в середовищі програмування Qt Creator.

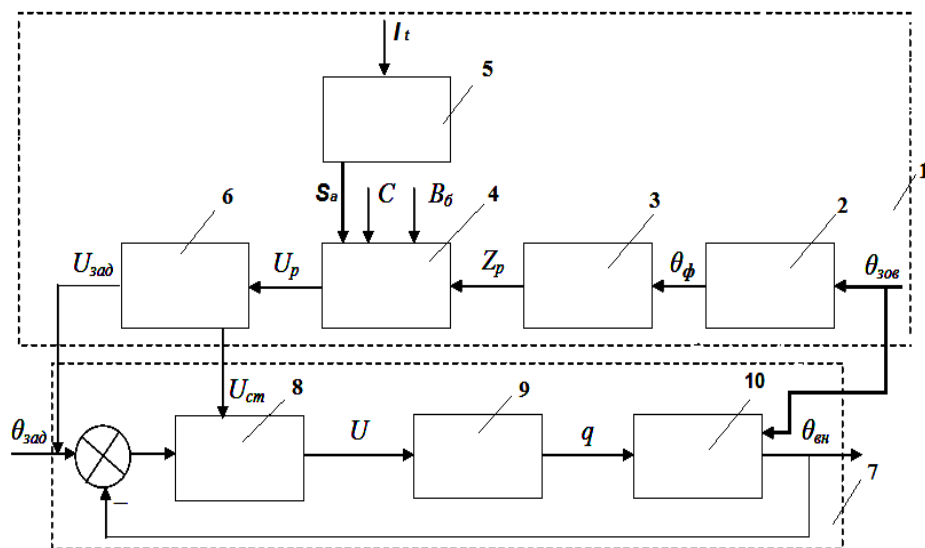


Рис. 3. Архітектура інтелектуальної системи енергоефективного управління комбінованою електротехнологічною водоочисткою:  $\theta_{зов}$  – сигнал із сприймаючих елементів;  $\theta_{\phi}$  – очищені інформаційні сигнали;  $Z_p$  – збурення;  $B_b$  – можливі варіанти дій управління і показники якості;  $C$  – дані вартості складових електротехнологічного процесу;  $U_p$  – вибір стратегії управління;  $U$  – діюча стратегія управління;  $I_t$  – інформація, яку вводять технологи-оператори;  $S_a$  – оновлений набір стратегій;  $U_{зад}$  – зміна управління;  $U_{см}$  – нові образи стратегії управління;  $\theta_{зад}$  – задане значення для управління;  $\theta_{вн}$  – сформоване значення управління;  $q$  – вплив на засоби водоочистки

Виробнича апробація системи управління відбулась на підприємствах м'ясопереробного профілю та малої металургії. Попередньо для таких підприємств були розроблені водні паспорти та об'єктно-орієнтовані ТР.

На основі використання обладнання РМКЕВ для м'ясопереробного підприємства були виявлені добові дози забруднювачів (ДДЗ) – жири (добові витрати – 1500 м<sup>3</sup>/добу ( $\pm$  300 м<sup>3</sup>/доба [3]). Однак, жири відносяться до органічних забруднювачів і їх повне видалення не забезпечує очистку стоків від азоту амонійного, фосфору та хлоридів. Саме тому виникає необхідність введення ДДЗ для неорганічного забруднювача, виходячи із попередніх досліджень [1, 4]. Таким забруднювачем прийнято концентрацію хлоридів, як найскладніший для видалення.

Виникнення нештатних ситуацій у системах водоочистки в умовах м'ясопереробного підприємства обумовлюється наступними чинниками:

- понаднормовий забій (призводить до значних перевищень концентрації жирів, фосфору, азоту амонійного та підвищеної каламутності стоків);
- додаткове миття технологічного обладнання (відбувається періодично і призводить до значних перевищень концентрацій синтетичних поверхнево-активних речовин (СПАР) та каламутності стоків);
- опорожнення ванн засолювання шкір (відбувається періодично і призводить до значних перевищень концентрацій хлоридів).

Впровадження розроблених ТР для функціонування електротехнологічної системи водоочистки, яка включає електрофлокоагуляцію, електролізну деструкцію, сорбційну

фільтрацію, седиментацію та гідроциклонування дало змогу повністю виконати вимоги щодо гранично-допустимих концентрацій забруднювачів у стічних водах підприємства (рис. 4).

Налаштування алгоритмів управління електротехнологічним обладнанням дозволило виконати вимоги щодо забезпечення якості водоочистки при мінімальному енергоспоживанні з використанням критерію енергоефективності (2): протягом календарного місяця він мав незначні відхилення від нуля  $EF_y = \pm 9,6\%$ , включаючи роботу в умовах невизначеності, викликані дією нештатних ситуацій (рис. 5).

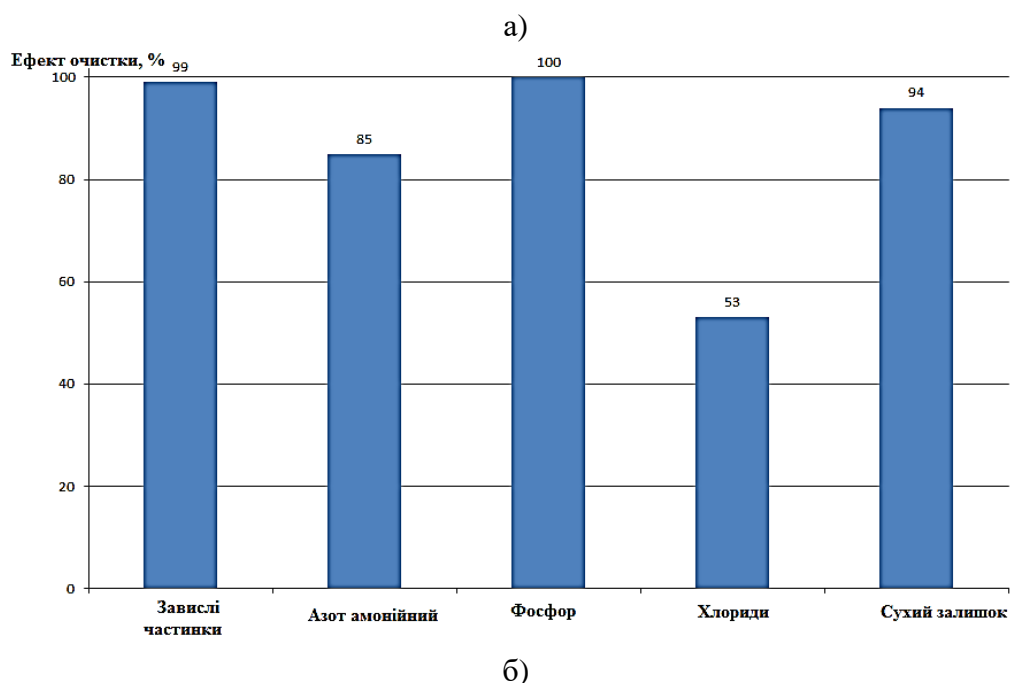


Рис. 4. Промислова електротехнологічна водоочистка на підприємстві м'ясопереробки: А – зовнішній вигляд системи водоочистки, Б – ефективність комбінованої електротехнологічної очистки стічних (на прикладі м'ясопереробного підприємства)

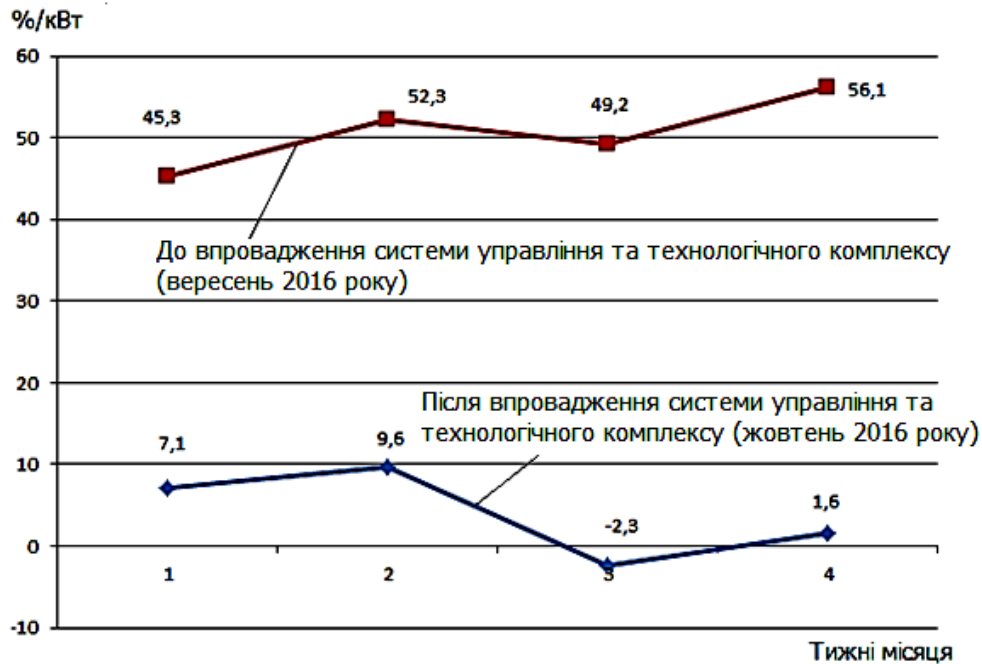
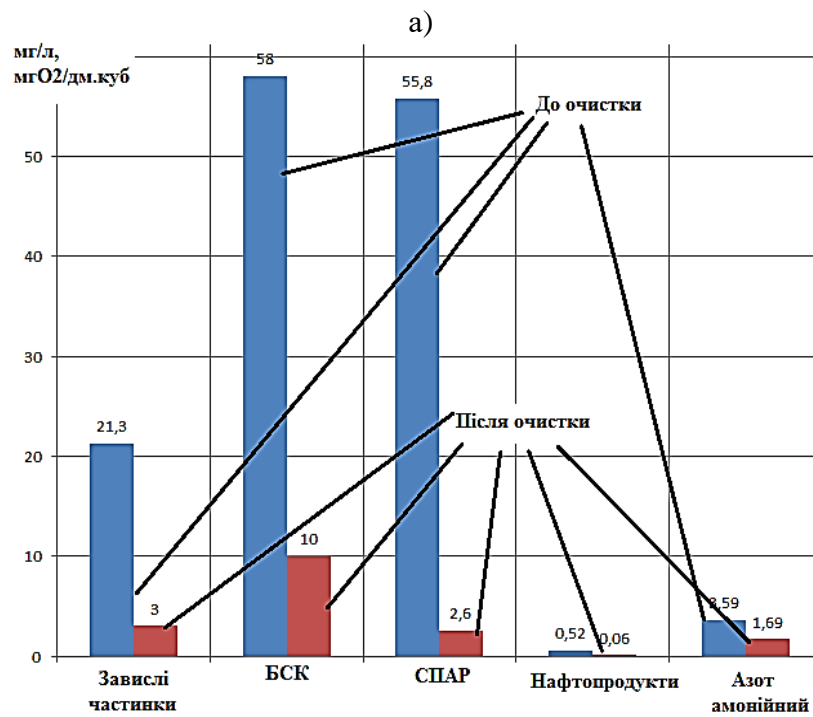
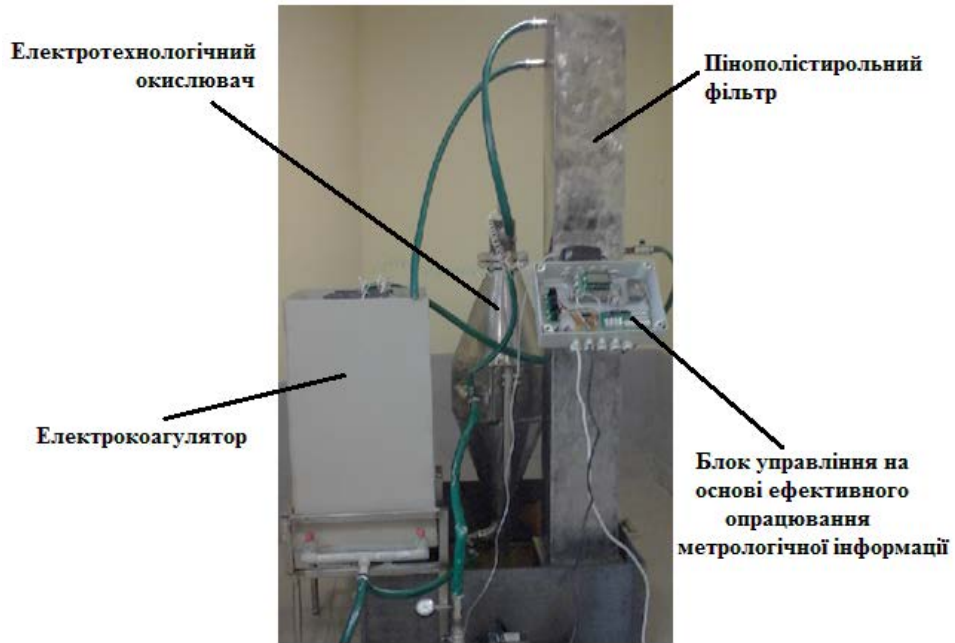


Рис. 5. Порівняння енергоефективності електротехнологічної промислової водоочистки (на прикладі м'ясопереробного підприємства)

Добові витрати стічних вод підприємства малої металургії, які потребують очистки –  $18 \text{ м}^3/\text{добу}$  ( $\pm 2 \text{ м}^3/\text{добу}$ ). На основі використання обладнання РМКЕВ виявили ДДЗ для стоків підприємства малої металургії СПАР. Експериментально встановлені умови для видалення азоту амонійного і нафтопродуктів.

Нештатні ситуації можуть бути викликані потраплянням у стічні води непередбачуваних забруднювачів. Саме тому у склад комбінованої електротехнологічної системи водоочистки включено електрокоагулятор із функцією рН-корекції лужних розчинів з подальшою нейтралізацією стоків та сорбційний фільтр, деаератор із електролізною деструкцією, гідродинамічні інтенсифікатори.

Налаштування функціонування електротехнологічного обладнання з урахуванням критерію енергоефективності дозволило виконати вимоги щодо забезпечення якості водоочистки при найменших витратах електроенергії (рис. 6). Виробничі спостереження за процесами водоочистки з визначенням рівня енерговитрат протягом календарного місяця дозволили одержати відхилення  $EF_y = \pm 3,4\%$  (рис. 7).



б)

Рис. 6. Комбінована система електротехнологічної водоочистки (на прикладі підприємства малої металургії): А – зовнішній вигляд системи водоочистки, Б – ефективність функціонування комбінованої електротехнологічної очистки стічних вод



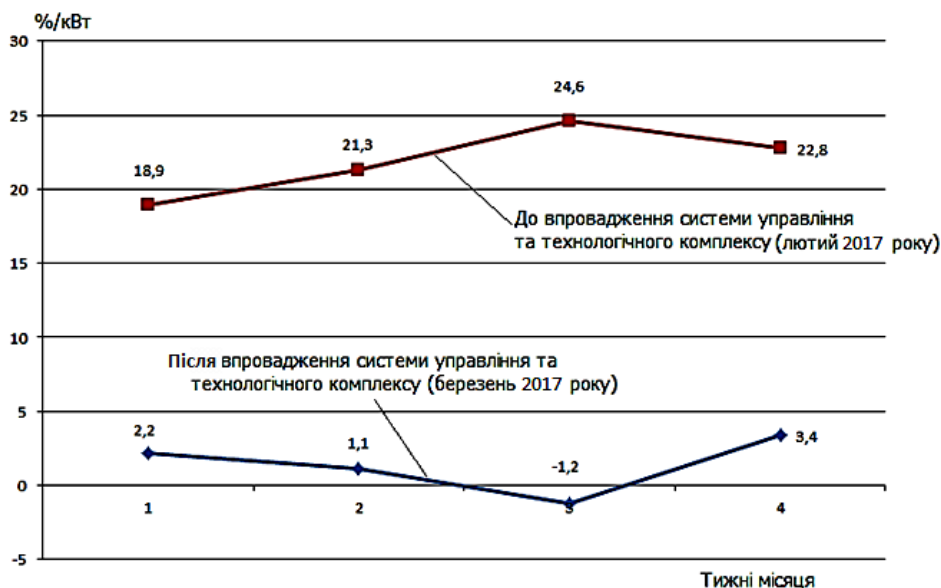


Рис. 7. Порівняння енергоефективності функціонування електротехнологічної промислової водоочистки (на прикладі підприємства малої металургії)

Аналізуючи результати виробничого впровадження промислових електротехнологічних систем водоочистки підвищеної енергоефективності на підприємствах м'ясопереробки та малої металургії, можна констатувати, що використання інтелектуального управління видаленням забруднювачів із стоків на основі синтезу алгоритмів управління та реалізації об'єктно-орієнтованих технологічних регламентів функціонування комбінованих електротехнологічних систем водоочистки дозволили виконати екологічні вимоги щодо якості водоскиду та підвищити енергоефективність. Крім того, на таких промислових об'єктах стало можливим повторне використання очищеної води у технологічних процесах (миття обладнання та полив території).

Підтверджено, що удосконалення підходів створення об'єктно-орієнтованих ТР комбінованих електротехнологічних систем водоочистки базується на використанні РМКЕВ та методі допустимих добових доз забруднювачів, системному оцінюванні об'єктів водоскиду з урахуванням водного паспорту підприємства.

**Висновок.** Виробниче впровадження об'єктно-орієнтованих ТР систем водоочистки на підприємствах м'ясопереробки та малої металургії дозволили виконати екологічні вимоги щодо якості очистки стічних вод з дотриманням граничних допустимих концентрацій забруднювачів та реалізувати ресурсозберігаючі схеми водоскиду з повторним використанням води у технологічних процесах. Експлуатаційні випробування електротехнологічного комплексу водоочистки на промислових об'єктах з удосконаленими алгоритмами функціонування на основі критерію енергоефективності дозволили на 15-18% знизити загальне енергоспоживання та забезпечити якість очистки багатоконпонентних стоків. Відхилення критерію енергоефективності для підприємства м'ясопереробки та малої металургії склали  $\pm 9,6\%$  та  $\pm 3,4\%$  відповідно.

Аналіз отриманих на промислових об'єктах результатів функціонування створених систем водоочистки показав, що використання об'єктно-орієнтованих технологічних регламентів розширяє можливості налаштування базового електротехнологічного

обладнання комбінованих систем водоочистки дозволяє суттєво зменшити негативну дію нештатних ситуацій техногенного і природного походження.

### Література

1. Гончаров Ф.И. Исследование механизма накопления осадка на стенках труб в сети водоканала / Ф.И. Гончаров // Сб. научных трудов "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании" Одесса: ОНТУ - 2007, Том 20 – С.58-67.
2. Clark, N.A. The inactivation of purified coxsackie virus in water by chlorine / N.A. Clark, P.W. Kabler // Am. J. Hyg. USA. – 1954 – № 59. – P. 119–127.
3. Kuchta, J.M. Enhanced chlorine resistance in tap water-adapted Legionella pneumophila as compared with agar medium-passaged strains / J.M. Kuchta, S.J. States, J.E. McGlaughlin // Applied Environmental Microbiology – 1985 – Vol. 50 – P. 21–26.
4. Гончаров Ф. І. Енерго- та ресурсозберігаюча схема системи водопостачання населених пунктів / Ф.І. Гончаров, В.М. Штепа // Наукові нотатки Луцького національного технічного університету: міжвузівський збірник. – Луцьк: ЛНТУ, 2009. – № 21. – С. 49-54.
5. Люгер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2005. – 864 с.
6. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер с англ / С. Рассел, П. Норвиг. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.
7. Штепа В. Н. Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: научно-технический журнал. – 2016. – № 5. – С. 479 – 487.

### References

1. Гончаров Ф.И. (2007) *Issledovanie mexanizma nakopleniya osadka na stenках trub v seti vodokanala* [Investigation of the mechanism of accumulation of sediments on the water pipes in the network of water pipes] Sat scientific works "Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education" Odessa. T. 20, p.58-67. [in Russian].
2. Clark, N.A. (1954) The inactivation of purified coxsackie virus in water by chlorine. Am. J. Hyg. USA. no. 59. P. 119–127.
3. Kuchta, J.M. (1985) Enhanced chlorine resistance in tap water-adapted Legionella pneumophila as compared with agar medium-passaged strains. Applied Environmental Microbiology. Vol. 50. P. 21–26.
4. Goncharov F. I. (2009) *Energo- ta resursozberigayucha sxema sistemi vodopostachannya naselenix punktiv* [Energy and resource-saving scheme of the water supply system of settlements] Scientific notes of Lutsk National Technical University: Intercollegiate collection. Lutsk: no. 21. P. 49-54.
5. Lyuger Dzh.F. (2005) *Iskusstvennyj intellekt: strategii i metody resheniya slozhnyx problem* [Artificial intelligence: strategies and methods for solving complex problems] Translation - M:Williams, 864 p. [in Russian].
6. Rassel S., Norvig P. (2006) *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyj podxod* [Artificial intelligence: a modern approach] Translation - M:Williams, 1408 p. [in Russian].
7. Shtepa V.N. (2016) *Konceptualnye osnovy energoeffektivnoj sistemy upravleniya kombinirovannymi sistemami vodoochistki* [Conceptual bases of the energy-efficient control system of combined water purification systems]. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. Power engineering: Scientific and Technical Journal. no. 5. P. 479 – 487. [in Russian].

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВОДООЧИСТКИ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

КАПЛУН В.В., ШТЕПА В.М., КОТ Р.Е.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Совершенствование подходов создания и процессов функционирования электротехнологических систем очистки сточных вод промышленных объектов в соответствии с требованиями экологической безопасности и рационального использования энергетических ресурсов.

**Методика.** Путем анализа современных методов водоочистки промышленных объектов предложено интеллектуальное управление удалением загрязнителей стоков на основе синтеза

алгоритмов управління и реализации объектно-ориентированных технологических регламентов функционирования комбинированных электротехнологических систем водоочистки с учетом требований экологической безопасности и уменьшения уровней энергопотребления.

**Результаты.** В работе обосновано и практически реализовано подходы для разработки объектно-ориентированных технологических регламентов комбинированных электротехнологических систем водоочистки промышленных объектов.

**Научная новизна.** Получил дальнейшее развитие метод синтеза алгоритмов управления и разработки объектно-ориентированных технологических регламентов комбинированных электротехнологических систем водоочистки промышленных объектов повышенной энергоэффективности с учетом действия нештатных ситуаций техногенного и природного происхождения.

**Практическая значимость.** На основе специализированного программного обеспечения разработаны алгоритмы управления электротехнологической установкой водоочистки, предложены объектно-ориентированные технологические регламенты управления функционированием комбинированными электротехнологическими системами очистки сточных вод промышленных объектов для уменьшения электропотребления.

**Ключевые слова:** водоочистка промышленных объектов, экологическая безопасность, объектно-ориентированные технологические регламенты, алгоритмы управления, энергоэффективность.

## IMPROVEMENT OF THE PROCESSES OF THE FUNCTIONING OF SYSTEMS OF INDUSTRIAL ELECTROTECHNOLOGICAL WATER PURIFICATION BASED ON ENERGY EFFICIENCY CRITERIA

KAPLUN V.V., SHTEPA V.M., KOT R.E.  
*Kyiv National University of Technologies and Design*

**Purpose.** Improvement of the approaches to the creation and processes of the functioning of electrotechnological sewage treatment systems for industrial facilities in accordance with the requirements of environmental safety and rational use of energy resources.

**Method.** By means of the analysis of modern methods of water purification of industrial facilities, intelligent control over the removal of pollutants of effluents is proposed on the basis of the synthesis of control algorithms and the implementation of object-oriented technological regulations for the operation of combined electrotechnical water treatment systems, taking into account the requirements of ecological safety and reducing energy consumption levels.

**Results.** The work substantiates and practically realizes the approaches for the development of object-oriented technological regulations of combined electrotechnical water treatment systems for industrial facilities.

**Originality.** The method of synthesis of algorithms for control and development of object-oriented technological regulations of combined electrotechnological systems for water purification of industrial facilities with increased energy efficiency was developed, taking into account the operation of abnormal situations of technogenic and natural origin.

**The practical significance.** On the basis of specialized software, algorithms for managing the electrotechnological plant for water treatment have been developed, and object-oriented technological regulations for managing the operation of combined electrotechnological sewage treatment systems for industrial facilities have been developed to reduce power consumption.

**Keywords:** water treatment of industrial facilities, environmental safety, object-oriented technological regulations, control algorithms, energy efficiency.