

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОГО АЛГОРИТМУ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВОДООЧИЩЕННЯ В СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Інга Уряднікова

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037
канд. техн. наук, uyardnikova.iv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3750-876X

DOI: 10.32347/2524-0021.2022.40.59-64

Анотація. Захист та безпека енергетичних систем від усіх видів загроз, в тому числі, загроз комплексного характеру на сьогодні в Україні мають першочергове значення. Тому управління техногенними ризиками в енергетичних системах, що відносяться до критичної інфраструктури, і насамперед в теплоенергетичних системах ТЕЦ і ТЕС, вихід з ладу яких може призвести до неможливості проживання населення на зазначеній території або об'єкті, проведення там господарчої діяльності, загибелі людей або до значних матеріальних збитків, є важливим і актуальним. З метою обґрунтування використання оборотних систем водопостачання теплоенергетичних об'єктів для підвищення надійності і безпеки їх експлуатації був запропонований узагальнений алгоритм оптимального управління якістю при водоочищенні з метою мінімізації техногенного ризику для будь-якої системи водоочищення. Аналіз отриманих результатів показав, що узагальнений алгоритм оптимального управління якістю при водоочищенні з метою мінімізації техногенного ризику для будь-якої системи водоочищення може бути отриманий у разі використання такої методології: складання структурно-функціональної блок-схеми системи водоочищення; здійснення аналізу технологічних режимів, що впливають на якість; техніко-економічного аналізування величин, які обмежують значення режимів, що дають мінімальне забруднення; одержання математичних виразів, що відбивають залежність величини забруднення і величини обмежень від конкретних технологічних режимів; уведення даних у комп'ютеризовану систему управління, на вхідний порт якого подається поточне значення жорсткості, на виході установки водоочищення, з вихідного порту якого знімаються конкретні значення технологічних режимів, підтримуваних органами управління установкою водоочищення.

Ключові слова: техногенні ризики, оборотні системи водопостачання, електрокоагуляція, теплоенергетика.

ВСТУП

Рациональне використання водних ресурсів в Україні є однією з найбільш важливих проблем енергетичних підприємств. Зростання потужностей ТЕС, ТЕЦ і обмеженість дебіту води потребує збільшення доли оборотних систем водопостачання і переходу від прямоочних до оборотних циклів в теплоенергетиці. Сучасні теплоенергетичні об'єкти (ТЕС, ТЕЦ) використовують виключно

паротурбінні агрегати, що працюють на водному теплоносії.

Системи підготовки та очищення води є важливою складовою загальної системи технічного водопостачання в теплоенергетиці, оскільки від якості води залежить надійність і економічність експлуатації енергетичного обладнання. ТЕС і ТЕЦ включають в свій виробничий цикл значну кількість води, яка надходить для заповнювання контуру паротурбінної установки, компенсації втрат пари і

конденсату під час роботи, підживлення теплових мереж, а також охолодження конденсаторів турбін та інших апаратів і установок. Більша частина відпрацьованої води йде на зворотний цикл, а решта, проходить відповідне очищення та скидається в навколишнє середовище.

Система водоочищення є однією з найважливіших систем, що забезпечує нормальну роботу ТЕЦ і ТЕС. Будь-які порушення в системі водоочищення ТЕС і ТЕЦ негайно позначаються як на «вході», при надходженні води в енергоагрегати, так і на «виході», при скиданні використаної води в екосистему. Незважаючи на численні роботи, присвячені оцінці, розрахункам і управлінню ризиками, питання розрахунку і управління ризиками в системах водоочищення, використовуваних у теплоенергетиці, і вплив цих ризиків на екологічну безпеку докілья практично не висвітлене, у той час, як це питання має велике народногосподарське значення [1]. Захист та безпека енергетичних систем від усіх видів загроз, в тому числі загроз комплексного характеру, на сьогодні в Україні мають першочергове значення.

Тому управління техногенними ризиками в енергетичних системах, що відносяться до критичної інфраструктури, і насамперед в теплоенергетичних системах ТЕЦ і ТЕС, вихід з ладу яких може призвести до неможливості проживання населення на зазначеній території або об'єкті, проведення там господарчої діяльності, загибелі людей або до значних матеріальних збитків, є важливим і актуальним.

МЕТА І МЕТОДИ

Метою дослідження є наукове обґрунтування використання оборотних систем водопостачання теплоенергетичних об'єктів для підвищення надійності та безпеки їх експлуатації.

Для досягнення зазначеної мети в роботі була поставлена та розв'язана задача розроблення узагальненого алгоритму оптимального управління якістю при водоочищенні з метою мінімізації

техногенного ризику для будь-якої системи водоочищення (на прикладі електрокоагуляційної очистки).

При дослідженні техногенних ризиків у разі штатної і нештатної роботи систем водоочищення був використаний апарат теорії автоматичного управління, а при розробці концепції оптимального управління ризиками були використані положення теорії оптимального управління. Експериментальні дослідження проведені на конкретних установках водоочищення та на їх моделях із використанням методик статистичного планованого експерименту.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Найбільш розповсюдженим теплоносієм у теплоелектрогенеруючому обладнанні є вода. Від якісних характеристик води значною мірою залежить ризик порушень в роботі зазначеного обладнання, його зупинки до регламентованого терміну ремонту і виходу з ладу цього обладнання.

Кожен з вказаних ризиків призведе до значних економічних і екологічних втрат, причому останні, у випадку їхньої оборотності, також опосередкують через економіку. Крім того, може бути безповоротна екологічна шкода у випадку невідновності природного середовища і смерті людей у цьому середовищі.

Основний показник якості води, одержаної для технологічних нестатків – жорсткість G , мг-екв/кг. Причому, мінімальне значення жорсткості максимально знижує ризик. Отже, при водоочищенні необхідно прагнути до мінімального економічно виправданого значення жорсткості.

Одним з найбільш ефективних методів у водопідготовці є метод електрокоагуляційної очистки, при якому порівняно легко керувати значеннями жорсткості за рахунок зміни технологічних режимів.

Аналізуючи схему роботи електрокоагулятора [2] в технологічній схемі електрокоагуляційного процесу пом'якшення й очищення природних вод (рис. 1) можна

прийти до висновку, що основними параметрами, що впливають на величину жорсткості води є щільність струму q А/м², тривалість електрообробки води в апараті t хв і швидкість течії води в електрокоагуляторі v м/хв. Слід зазначити, мінімальна жорсткість води відповідає мінімальному ризику того, що неочищена вода буде подана у технологічний процес чи скинута в навколишнє середовище. У такий спосіб функція G визначає не стільки жорсткість, скільки мінімальний ризик.

З погляду мінімального значення жорсткості, величини цих режимів легко визначаються.

Однак, ці ж режими впливають на такі економічні показники, як витрата металу електродів W мг/л, питома витрата електроенергії Q Вт · г/л і вихід металу електрода за струмом P мг/кг. Ці величини пов'язані з економічними показниками роботи та якістю очищення. Тому вони будуть обмежувати діапазон режимів при яких можна мати мінімальне значення G .

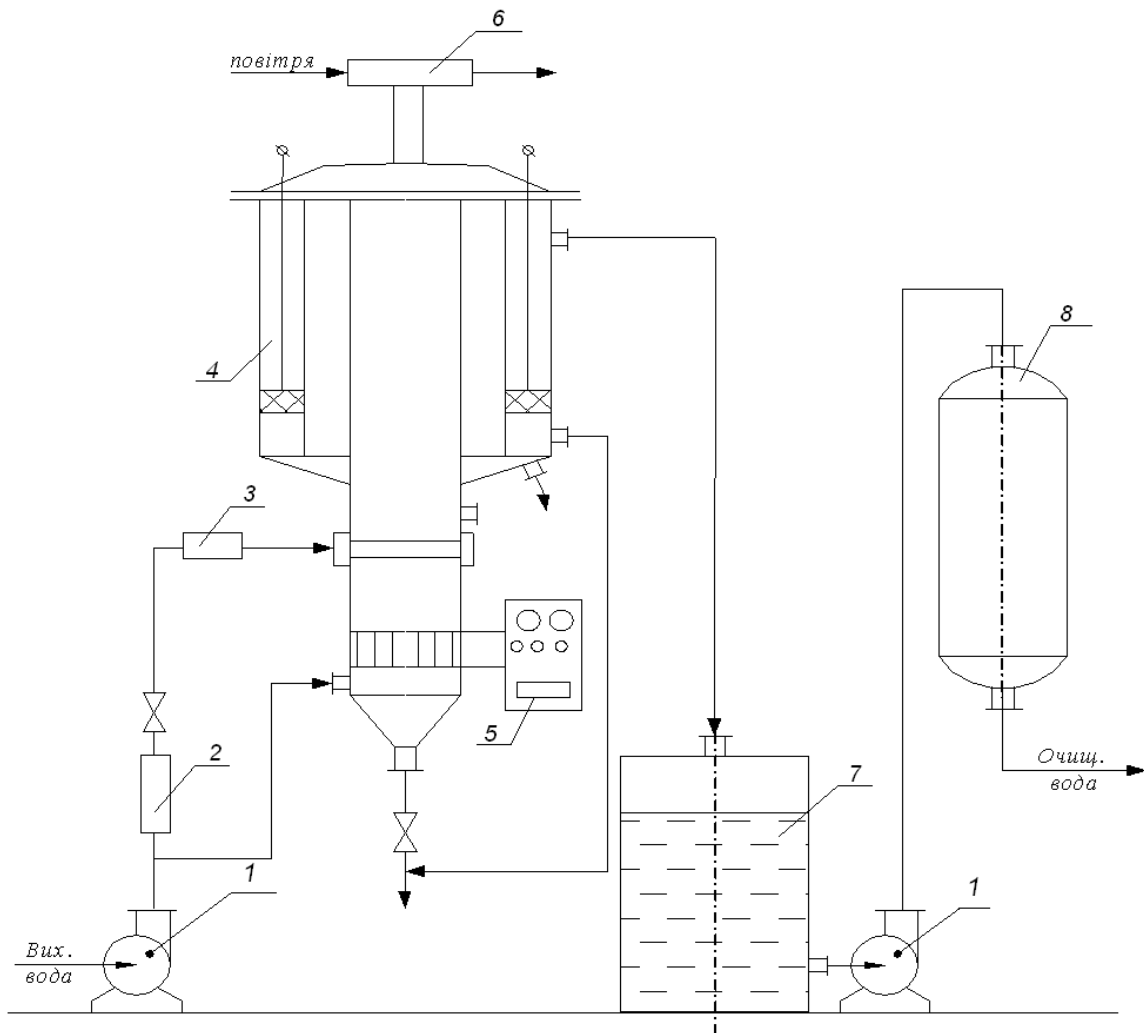


Рис. 1. Технологічна схема електрокоагуляційного процесу пом'якшення й очищення природних вод: 1 – відцентровий насос; 2 – водопідігрівач; 3 – водоповітряний ежектор; 4 – електрокоагулятор; 5 – випрямляючий агрегат; 6 – ежектор; 7 – збірник очищеної води; 8 – механічний фільтр

Fig. 1. Technological scheme of the electrocoagulation process of softening and purification of natural waters: 1 – centrifugal pump; 2 – water heater; 3 – water-air ejector; 4 – electrocoagulator; 5 – straightening unit; 6 – ejector; 7 – collector of purified water; 8 – mechanical filter

Для того щоб детальніше дослідити це питання, було вирішено провести фізичне моделювання процесів, що відбуваються в електрокоагуляційній установці.

Для цього була створена експериментальна модель електрокоагулятора з органічного скла в масштабі 1:50. Така модель дозволяла застосовувати всі режими обробки води, які зустрічаються на практиці при роботі електрокоагуляційної установки. Крім того, така конструкція моделі є прозорою, що давало можливість спостерігати всі процеси, які відбувалися в середині установки. Діапазони режимів обробки застосовувалися такі ж, які зазвичай використовуються при обробці води в електрокоагуляторі. В кожному режимі проводилося по три вимірювання, причому за дійсне значення бралася середня величина, яка наносилася на графік.

Обробка графіків роботи електрокоагулятора з використанням методу статистично планованого експерименту і методу найменших квадратів дало можливість одержати математичні залежності зазначених величин від q , v і t . Ці залежності мають вигляд:

$$G = 4,12 \cdot q^{-1,23} \cdot t^{-1,95} \cdot v^{-1,6}; \quad (1)$$

$$W = 0,2 \cdot q^{0,85} \cdot t^{0,8} \cdot v^{-0,15}; \quad (2)$$

$$Q = 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot q^{0,84} \cdot t^{0,95} \cdot v^{-0,1}; \quad (3)$$

$$P = 0,165 \cdot q^{0,25} \cdot t^{0,33} \cdot v^{-0,05}. \quad (4)$$

Таким чином, нам необхідно щоб $G \rightarrow \min$ в умовах, коли $W \leq L_1$, $Q \leq L_2$ і $P \leq L_3$, причому L_1 , L_2 і L_3 вибирається з економічних розумінь.

Іншими словами, нам необхідно мінімізувати цільову функцію G у рамках обмежень $W \leq L_1$, $Q \leq L_2$ і $P \leq L_3$.

Для рішення задачі в узагальненому вигляді введемо позначення:

$$\begin{aligned} A &= 0,2; B = 1,53 \cdot 10^{-3}; C = 0,165; \\ D &= 4,12; x_1 = 0,85; x_2 = 0,8; x_3 = 0,15; \\ y_1 &= 0,84; y_2 = 0,95; y_3 = 0,1; z_1 = 0,25; \\ z_2 &= 0,33; z_3 = 0,05; k_1 = -1,23; \\ k_2 &= -1,95; k_3 = -1,6. \end{aligned}$$

У цьому випадку одержимо:

$$G = D \cdot q^{k_1} \cdot t^{k_2} \cdot v^{k_3} \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$W = A \cdot q^{x_1} \cdot t^{x_2} \cdot v^{x_3} \leq L_1; \quad (6)$$

$$Q = B \cdot q^{y_1} \cdot t^{y_2} \cdot v^{y_3} \leq L_2; \quad (7)$$

$$P = C \cdot q^{z_1} \cdot t^{z_2} \cdot v^{z_3} \leq L_3. \quad (8)$$

У даному випадку рівняння (5) є нелінійною мінімізуємою цільовою функцією. А рівняння (6), (7) і (8) умовами, що обмежують область можливих значень технологічних режимів.

Оптимальними значеннями величин q , v і t будуть значення, отримані в результаті спільного рішення рівнянь (6), (7) і (8). Ці значення, підставлені в рівняння (5), дадуть мінімальне значення жорсткості в рамках обмежень, обумовлених насамперед прийнятною економічністю процесу.

Для рішення системи нелінійних нерівностей (6), (7), (8) проведемо їхню лінеаризацію і будемо вирішувати в логарифмічній формі, представивши їх як строгі рівності.

Тоді маємо:

$$\ln G = \ln D + k_1 \ln q + k_2 \ln t + k_3 \ln v; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \ln W &= \ln A + x_1 \ln q + x_2 \ln t + x_3 \ln v = \\ &= \ln L_1; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \ln Q &= \ln B + y_1 \ln q + y_2 \ln t + y_3 \ln v = \\ &= \ln L_2; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \ln P &= \ln C + z_1 \ln q + z_2 \ln t + z_3 \ln v = \\ &= \ln L_3. \end{aligned} \quad (12)$$

Перетворимо рівняння (10), (11) і (12) у такий спосіб:

$$\begin{aligned} x_1 \cdot \ln q + x_2 \cdot \ln t + x_3 \cdot \ln v &= \\ &= \ln L_1 - \ln A = M_1; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} y_1 \cdot \ln q + y_2 \cdot \ln t + y_3 \cdot \ln v &= \\ &= \ln L_2 - \ln B = M_2; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} z_1 \cdot \ln q + z_2 \cdot \ln t + z_3 \cdot \ln v &= \\ &= \ln L_3 - \ln C = M_3. \end{aligned} \quad (15)$$

Введемо нові значення: $q^* = \ln q$; $t^* = \ln t$; $v^* = \ln v$, і тоді система рівнянь (13) – (15) матиме наступний вигляд:

$$x_1 \cdot q^* + x_2 \cdot t^* + x_3 \cdot v^* = M_1; \quad (16)$$

$$y_1 \cdot q^* + y_2 \cdot t^* + y_3 \cdot v^* = M_2; \quad (17)$$

$$z_1 \cdot q^* + z_2 \cdot t^* + z_3 \cdot v^* = M_3. \quad (18)$$

Цільова функція буде:

$$G^* = D^* + k_1 \cdot q^* + k_2 \cdot t^* + k_3 \cdot v^*. \quad (19)$$

Оптимальними значеннями q^* , t^* і v^* будуть рішення, що задовольняють рівнянням (16), (17) і (18).

Після потенціювання одержуємо значення q , t і v , що будуть оптимальними значеннями для мінімальної величини жорсткості G у рамках обраних з економічних розумінь обмежень L_1 , L_2 , L_3 .

Це значення жорсткості G буде мінімальним і економічно доцільним для даних конкретних умов роботи та визначатиме мінімальний ризик роботи теплогенеруючих установок.

Безупинно контролюючи величину G , можна, у випадку зміни жорсткості, змінювати значення L_1 , L_2 , L_3 у бік збільшення й одержувати мінімально можливе значення жорсткості при більш високих економічних витратах, що буде виправдано, якщо на вхід електрокоагулятора надходить сильно забруднена вода.

Вище наведені розв'язки рівнянь можна реалізувати на комп'ютеризованій системі управління, на вхід якої безупинно подається величина жорсткості води, у результаті чого на виході формуються оптимальні значення режимів водообробки, що забезпечують значення жорсткості, які дають мінімальний ризик при експлуатації.

Таким чином, оптимізацію техногенних ризиків складних систем при наявності нелінійних обмежень можна досить швидко розрахувати для будь-якої складної системи.

Узагальнений алгоритм оптимального управління якістю при водоочищенні з метою мінімізації техногенного ризику для будь-якої системи водоочищення може бути отриманий у разі використання такої методології:

– складання структурно-функціональної блок-схеми системи водоочищення;

- здійснення аналізу технологічних режимів, що впливають на якість;
- техніко-економічного аналізування величин, які обмежують значення режимів, що дають мінімальне забруднення;
- одержання математичних виразів, що відбивають залежність величини забруднення і величини обмежень від конкретних технологічних режимів (метод статистично планованого експерименту чи метод найменших квадратів);
- уведення даних у комп'ютеризовану систему управління, на вхідний порт якої подається поточне значення жорсткості, на виході з установки водоочищення, з вихідного порту якої знімаються конкретні значення технологічних режимів, підтримуваних органами управління установкою водоочищення.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Оптимізацію роботи будь-якої системи водоочищення слід проводити, вибираючи у якості цільової функції економічні показники, тобто мінімізуючи витрати у рамках обмежень, за межі яких не слід виходити.
2. Рівняння, за допомогою яких розв'язується задача оптимізації у разі діючої системи водоочищення, слід розробляти, спираючись на реальні статистичні результати досліджень роботи, що дає можливість одержати рівняння, які у відомих межах досить точно описують роботу системи і ті залежності, які існують під час роботи.
3. Додавання аналітичних рівнянь може бути рекомендовано тільки на стадії проєктування, а результати, які можна одержати за їх допомогою, слід розглядати як дуже приблизні.
4. У разі додавання рівнянь, як аналітичних, так і емпіричних, передусім слід звертати увагу на енергетичні характеристики процесів водоочищення, від яких, як правило, значною мірою залежить економічна ефективність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Качинский А. Б. Структурный анализ системы обеспечения экологической и природно-техногенной безопасности Украины / А. Б. Качинский, Н. В. Агаркова // Системні дослідження та інформаційні технології. 2013. № 1. С. 7–15.
2. Uriadnikova I. V., Lebedev V. H., Zaplatynskyi V. M., Tsyhanenko O. I. Early determination and evaluation of technogenic risks within the water purification systems of TSS and TPSS // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, № 1. S. 95-101. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362.

REFERENCES

1. Kachynskiy, A. B., & Aharkova, N. V. (2013). Structural analysis of the system of maintenance of ecological and natural-technogenic safety of Ukraine. *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii*, 1, 7-15. Retrieved from <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/50012>.
2. Uriadnikova, I. V., Lebedev, V. H., Zaplatynskyi, V. M., & Tsyhanenko, O. I. (2022). Early determination and evaluation of technogenic risks within the water purification systems of TSS and TPSS. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 95–101. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1>.

Development of a generalized algorithm for optimal management of water treatment quality in circulating water supply systems

Inga Uriadnikova

Abstract. Protection and security of energy systems from all types of threats, including threats of a complex nature, are of primary importance in Ukraine today. Therefore, the management of technogenic risks in energy systems related to critical infrastructure and, first of all, in thermal energy systems of thermal power plants and thermal power plants, the failure of which can lead to the impossibility of living in the specified territory or object, carrying out economic activities there, loss of life or significant material damage is important and relevant. In order to justify the use of reversible water supply systems of thermal power facilities to increase the reliability and safety of their operation, a generalized algorithm of optimal quality management during water purification was proposed in order to minimize technogenic risk for any water purification system. The analysis of the obtained results showed that the generalized algorithm of optimal quality management during water treatment in order to minimize technogenic risk for any water treatment system can be obtained in the case of using the following methodology: drawing up a structural and functional block diagram of the water treatment system; analysis of technological modes affecting quality; technical and economic analysis of the values that limit the values of the regimes that give minimal pollution; obtaining mathematical expressions that reflect the dependence of the amount of pollution and the amount of restrictions on specific technological modes; entering data into the computerized control system, the input port of which is supplied with the current value of stiffness, at the output of the water treatment plant, from the output port of which the specific values of the technological modes supported by the control bodies of the water treatment plant are taken.

Keywords: technogenic risks, reversible water supply systems, electrocoagulation, thermal power engineering.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2022