
doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.04.087>
УДК 519.62:532.5:681.516.75

А.П. Сафоник, д-р техн. наук, **І.М. Таргоній**, **І.М. Грицюк**
Національний університет водного господарства та природокористування
(Україна, 33028, Рівне, вул. Соборна, 11,
тел. +38 (0362) 633209; e-mail: a.p.safonyk@nuwm.edu.ua;
e-mail: targoniy93@ukr.net; e-mail: i.m.hrytsiuk@nuwm.edu.ua)

Розробка та автоматизація електромагнітної установки очищення технологічних вод від феромагнітних домішок

Розглянуто процес очищення технологічних вод від феромагнітних домішок. Розроблено структурну схему зв'язків параметрів процесу вилучення феромагнітних домішок, що дало змогу провести комп'ютерний експеримент і визначити основні конструктивні параметри процесу. На основі розробленої математичної моделі процесу знезалізнення побудовано структурну схему алгоритму керування концентрацією феромагнітних домішок процесу знезалізнення технологічних вод, що передбачає регулювання напруженості магнітного поля, яке прикладено до електромагніту, та підтримання заданої сили струму на відповідному рівні. Передбачено автоматичне і ручне керування процесом відображення помилок в роботі відповідних пристроїв, а також відображення головних інформативних параметрів технологічного процесу в реальному часі з використанням SCADA — системи WinCC Flexible.

К л ю ч о в і с л о в а: моделювання, процес очищення, феромагнітні домішки, магнітна очистка, знезалізнення, автоматизація, SCADA.

На даний час головними показниками якості технологічної води є ступінь очистки від різного виду домішок, які прискорюють зношення технологічного устаткування, спричиняють утворення корозії та зниження якості продукту, а в подальшому сприяють формуванню феромагнітних фракцій. Для видалення таких домішок запропоновано застосовувати метод магнітного очищення водного середовища, основною перевагою якого є відмова від використання хімічних реагентів. Таке очищення є екологічно безпечним, а отже, актуальним [1—6]. Проте у більшості наукових робіт не враховано взаємний вплив зміни параметрів фільтруючого середовища на якість очистки стічних вод. Зазвичай такі параметри використовують як константи, що вносить похибку у розрахунки.

© Сафоник А.П., Таргоній І.М., Грицюк І.М., 2020

Майже відсутні роботи, присвячені розробці алгоритмів автоматизованого керування технологічними процесами очистки стічних вод.

Актуальною є розробка математичних моделей, які мають підтвердження експериментальними даними, але потребують математичного обґрунтування. Особливо важливою задачею є перевірка універсальності, точності та адекватності розроблених математичних моделей.

Отже, в теорії процесів очищення є ряд важливих задач, що потребують вирішення, а саме:

- розробка універсальних математичних моделей, які описують технологічні процеси очистки технологічних вод в цілому при змінних параметрах системи;
- врахування факторів, які суттєво впливають на якість очищення, внесенням відповідних коефіцієнтів;
- розробка методів розрахунку очисних споруд з використанням комп'ютерного моделювання;
- розробка систем автоматизованого керування процесами очищення.

Матеріали та методи. Для комплексного знезалізнення технологічних вод розроблено установку (рис. 1), яка дозволяє використовувати такі параметри, як довжина магнітного фільтра, діаметр гранульованих частинок, об'єм фільтруючої загрузки тощо, для керування процесом вилучення феромагнітних домішок.

Довжина магнітного фільтра, діаметр гранульованих частинок, об'єм фільтруючої загрузки є сталими параметрами, тому вони враховуються при розрахунках ефективності вилучення залізовмісних домішок із технологічних вод на стадії проектування. До керованих параметрів процесу магнітного очищення стічних вод згідно з розробленою схемою можна віднести витрату вихідної води і силу струму в колі живлення електромагніту.

Керувати витратою вихідної води для забезпечення заданої концентрації залізовмісних домішок на виході із системи не є доцільним, тому що установка має змінну продуктивність і для розробки системи автоматизації потребує використання дороговартісних приладів, таких як витратоміри, перетворювач частоти для насоса подачі забрудненої води. Така система досить інерційна через рух рідини по трубопроводах і електромагнітному фільтру.

Керувати силою струму в колі живлення електромагніту значно простіше, оскільки напруженість магнітного поля, яка прямопропорційна силі струму в колі живлення електромагніту, впливає на здатність фільтруючої загрузки притягувати забруднення. Важливим фактором також

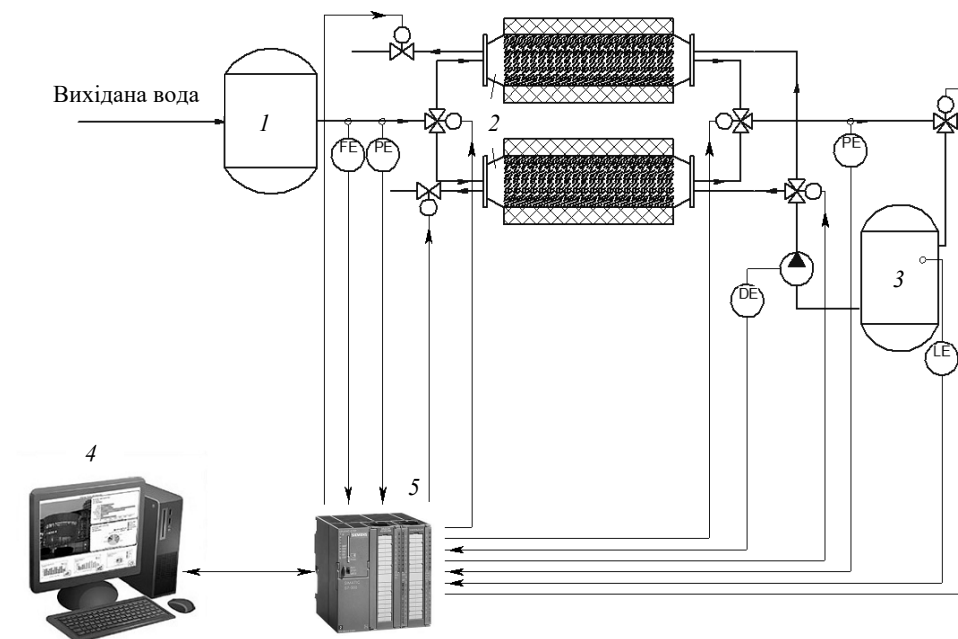


Рис.1. Схема установки очищення технологічних вод від феромагнітних домішок: 1 — накопичувальний бак; 2 — магнітний фільтр; 3 — регенеративний бак; 4 — персональний комп'ютер; 5 — програмований логічний контролер; (LE) — давач рівня води; (PE) — давач тиску води; (FE) — давач витрати води; (DE) — давач контролю обертів; — двоходовий клапан; — триходовий клапан; — насос

залишається мінімізація енерговитрат при протіканні процесу магнітного очищення та розробка економічно вигідного проекту для очистки стічних вод.

Розроблена система автоматизації процесу знезалізнення технічної води забезпечує збір та обробку даних про концентрацію залізовмісних домішок технічної води, що дозволяє зменшити корозію технологічного обладнання. У результаті це дозволить зменшити кількість робочого персоналу та витрати на ремонт установок, підвищити якість роботи обладнання.

Для автоматизації процесу магнітного очищення води розроблено схему автоматизації, за якої керування системою відбувається переведенням потоку фільтруючої рідини між двома фільтрами. Під час фільтрування робочим фільтром автоматично проводиться регенерація «забрудненого» фільтра. В результаті проведених досліджень отримано структурну схему зв'язків параметрів процесу вилучення феромагнітних домішок (рис. 2), згідно з якою вхідні і вихідні величини описано наступною залежністю:

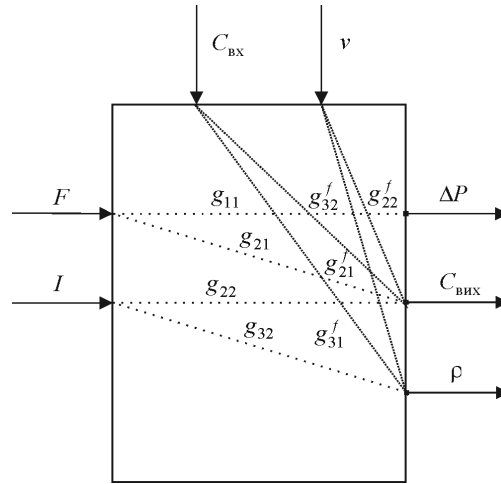


Рис. 2. Структурна схема зв'язків параметрів процесу

$$y = \begin{bmatrix} g_{11}(p) & 0 & 0 \\ g_{21}(p) & g_{22}(p) & 0 \\ 0 & g_{32}(p) & 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ g_{21}^f(p) & g_{22}^f(p) \\ g_{31}^f(p) & g_{32}^f(p) \end{bmatrix} f. \quad (1)$$

Тут $y = [\Delta P \ C_{\text{ВНХ}} \ \rho]^T$ — вектор вихідних параметрів, де ΔP — перепад тиску в електромагнітному фільтрі; $C_{\text{ВНХ}}$ — залишкова концентрація домішок в очищеній воді (експериментальне вимірювання); ρ — об'єм осаду забруднювача; $u = [F \ I \ 0]$ — вектор керування, де F — відповідно витрата вихідної води; I — сила струму, який протікає в колі живлення електромагніту для утворення заданої напруженості магнітного поля; $f = [C_{\text{ВХ}} \ v]^T$ — вектор неконтрольованих збурень, де $C_{\text{ВХ}}$ — загальна концентрація забруднень в технологічній воді; v — швидкість руху рідини; $g_{ij}(p), g_{ij}^f(p)$ — передаточні функції по відповідному каналу.

Математична модель процесу знезалізнення. Процес очищення води в магнітному фільтрі описується наступними формулами [7—12]:

$$\frac{\partial (\sigma(\rho) c(x, t))}{\partial t} + \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + v \frac{\partial c(x, t)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} = \beta(H, v, d) c(x, t) - \varepsilon \alpha(\rho) \rho(x, t),$$

$$c|_{x=0} = c_{in}(t), \ c|_{t=0} = 0, \ \rho|_{x=0} = 0, \ \rho|_{t=0} = 0, \quad (3)$$

$$v = \kappa(\rho) \operatorname{grad} p. \quad (4)$$

Тут $c(x, t)$ — концентрація домішок в рідкому середовищі, яке фільтрується; $\rho(x, t)$ — концентрація домішок, осаджених у зернистому фільтруючому матеріалі; β — коефіцієнт, що характеризує масові обсяги осадження домішкових частинок за одиницю часу [13—16],

$$\beta(H, v, d) = \frac{\beta_0 H^{0,75}}{vd^2},$$

де β_0 — вільний параметр; H — напруженість магнітного поля (пропорційна залежність від прикладеної сили струму [4]); v — швидкість фільтрування; d — діаметр гранул фільтруючого матеріалу; $\alpha(\rho, H)$ — коефіцієнт, що характеризує масові обсяги відірваних за той же час від гранул фільтруючого матеріалу домішкових частинок, $\alpha(\rho) = \alpha_0 + \varepsilon\alpha_*\rho(x, t)$; $c_{\text{вх}}(t)$ — концентрація домішкових частинок на вході фільтра; $\sigma(\rho)$ — пористість фільтруючого матеріалу (σ_0 — вихідна пористість фільтруючого матеріалу), $\sigma(\rho) = \sigma_0 - \varepsilon\sigma_*\rho(x, t)$; $\kappa(\rho)$ — коефіцієнт фільтрування ($\rho_0 = \rho(L, \tau_3)$),

$$\kappa(\rho) = \begin{cases} \kappa_0 - \varepsilon\gamma\rho(x, t), & \rho < \rho_0, \\ \kappa_0 - \varepsilon\gamma\rho(x, \tau_3), & \rho \geq \rho_0; \end{cases}$$

$\alpha_0, \alpha_*, \sigma_*, \kappa_0, \gamma, \varepsilon$ — жорсткі параметри, які характеризують відповідні коефіцієнти; $\alpha(\rho), \sigma(\rho), \kappa(\rho)$ — змінні параметри, які визначаються дослідним способом; ε — малий параметр; ρ — тиск.

Зазначимо, що на відміну від [7—12] в більш загальному випадку тиск $p = p(x, t)$ раціонально визначати в результаті розв'язання рівняння

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(\rho) \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial \sigma(\rho) p}{\partial t},$$

отриманого на основі рівняння руху і стану

$$\operatorname{div} v = \frac{\partial \sigma(\rho) p}{\partial t}$$

при крайових $p(0, t) = p_*(t)$, $p(L, t) = p^*(t)$ ($0 < t < \infty$) і початкових $p(x, 0) = p_*(x)$ ($0 < x < L$) умовах. Тут $p_*(t), p^*(t), p_*(x)$ — задані досить гладкі й погоджені в кутових точках області функції $G = \{(x, t)$:

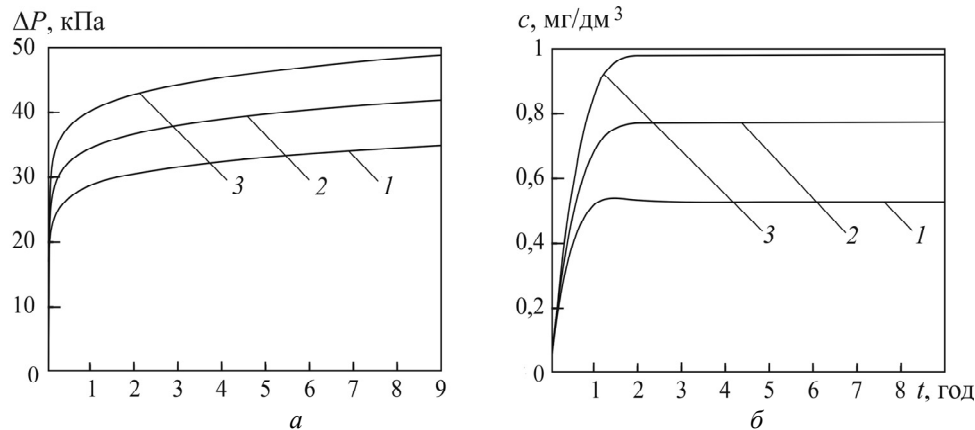


Рис. 3. Динаміка зміни напору (а) і концентрації забруднення (б) на виході магнітного фільтра при ступінчастій зміні вхідної швидкості: 1— $v_1=25$ м/год; 2 — $v_2=30$ м/год; 3 — $v_3=35$ м/год.

$0 < x < L, 0 < t < \infty$ }. У процесі розв'язання задачі можна визначати відповідне значення $\text{grad } p$, зокрема різницю тисків $\Delta P = p^*(t) - p_*(t)$ на вході й виході з фільтра.

Комп'ютерний експеримент. Для визначення передаточних функцій $g_{11}(p)$, $g_{22}(p)$, $g_{21}^f(p)$, $g_{22}^f(p)$ об'єктів відповідно по каналам витрата — перепад тиску, сила струму — концентрація домішок на виході, загальна концентрація забруднень в стічній воді — концентрація домішок на виході, швидкість руху рідини — концентрація домішок на виході було проведено комп'ютерний експеримент на основі розробленої математичної моделі.

На рис. 3, а і б, наведено отримані перехідні характеристики об'єкта відповідно по каналам витрата — перепад тиску та швидкість руху рідини — концентрація домішок на виході при $I = 8$ А, $c_{\text{вх}} = 2$ мг/дм³.

Перехідні характеристики об'єкта по каналу сила струму — концентрація домішок на виході та загальна концентрація забруднень в стічній воді — концентрація домішок на виході при $I = 8$ А, $v = 30$ м/год, $c_{\text{вх}} = 2$ мг/дм³, наведено на рис. 4, а та б.

На рис. 5, а, б, в, наведено перехідні характеристики об'єкта відповідно по каналам сила струму — об'єм осаду забруднювача ($c_{\text{вх}} = 2$ мг/дм³, $v = 30$ м/год), швидкість руху рідини — об'єм осаду забруднювача ($I = 8$ А, $c_{\text{вх}} = 2$ мг/дм³) та загальна концентрація забруднень в стічній воді — об'єм осаду забруднювача ($I = 8$ А, $v = 30$ м/год).

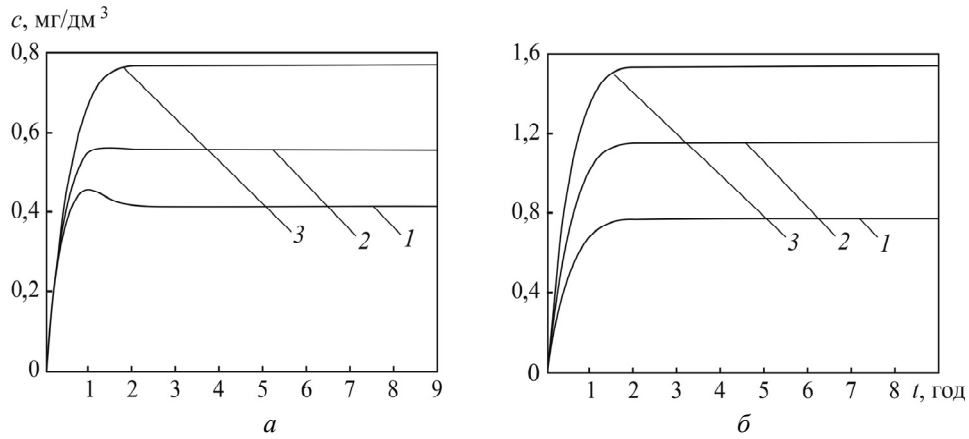


Рис. 4. Динаміка зміни концентрації забруднення на виході магнітного фільтра при ступінчастій зміні прикладеної сили струму (а) та вхідної концентрації забруднення (б): а — 1 — $I_1 = 8$ А; 2 — $I_2 = 12$ А; 3 — $I_3 = 16$ А; б — 1 — $c_{m_1} = 2$ мг/дм³; 2 — $c_{m_2} = 4$ мг/дм³; 3 — $c_{m_3} = 6$ мг/дм³

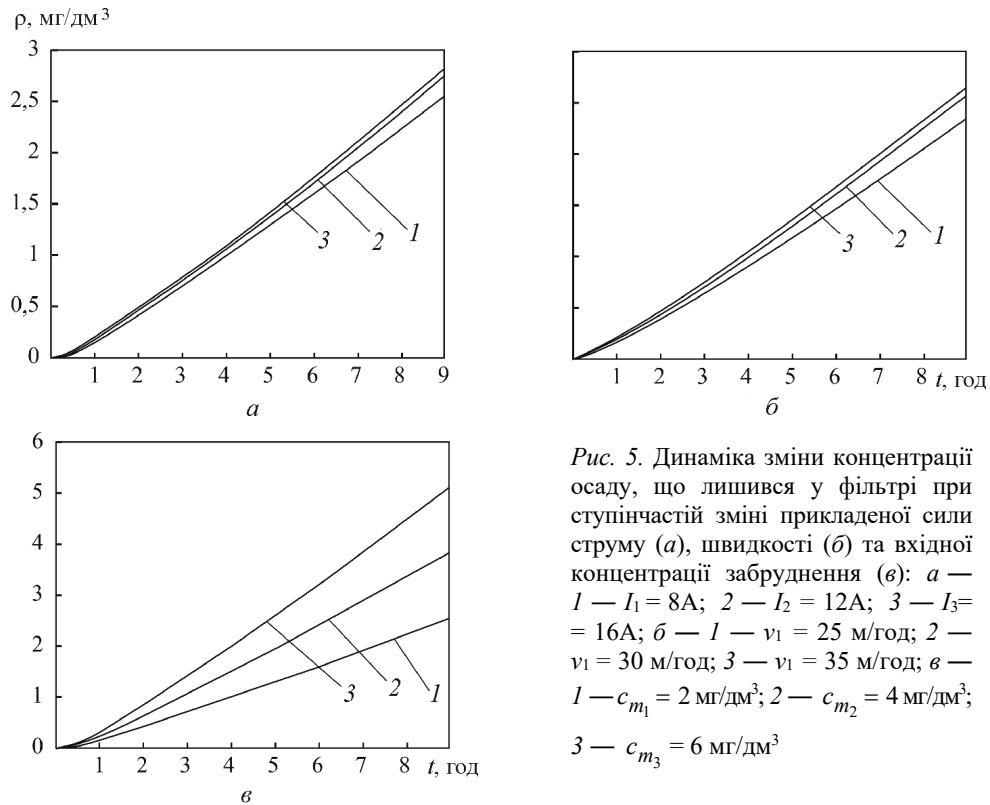


Рис. 5. Динаміка зміни концентрації осаду, що лишився у фільтрі при ступінчастій зміні прикладеної сили струму (а), швидкості (б) та вхідної концентрації забруднення (в): а — 1 — $I_1 = 8$ А; 2 — $I_2 = 12$ А; 3 — $I_3 = 16$ А; б — 1 — $v_1 = 25$ м/год; 2 — $v_1 = 30$ м/год; 3 — $v_1 = 35$ м/год; в — 1 — $c_{m_1} = 2$ мг/дм³; 2 — $c_{m_2} = 4$ мг/дм³; 3 — $c_{m_3} = 6$ мг/дм³

Згідно з результатами, наведеними на рис. 3—5, визначено передаточні функції $g_{22}(p)$ об'єкта по каналу сила струму — концентрація домішок на виході, $g_{21}^f(p)$ об'єкта по каналу загальна концентрація забруднень в стічній воді — концентрація домішок на виході, $g_{22}^f(p)$ об'єкта по каналу загальна концентрація забруднень в стічній воді — концентрація домішок на виході. Вони описуються аперіодичною ланкою першого порядку, а $g_{11}(p)$ об'єкта по каналу витрата — перепад тиску, $g_{32}(p)$ об'єкта по каналу сила струму — об'єм осаду забруднювача, $g_{31}^f(p)$ об'єкта по каналу загальна концентрація забруднень в стічній воді — об'єм осаду забруднювача та $g_{32}^f(p)$ об'єкта по каналу швидкість руху рідини — об'єм осаду забруднювача — реальною інтегруючою ланкою:

$$g_{11}(p) = \frac{k}{p(Tp + 1)}, \quad (5)$$

$$g_{22}(p) = \frac{k_{22}}{T_{22}p + 1}, \quad (6)$$

$$g_{32}(p) = \frac{k_4}{p(T_4p + 1)}, \quad (7)$$

$$g_{21}^f(p) = \frac{k_{21}}{T_{21}p + 1}, \quad (8)$$

$$g_{22}^f(p) = \frac{k_3}{T_3p + 1}, \quad (9)$$

$$g_{31}^f(p) = \frac{k_5}{p(T_5p + 1)}, \quad (10)$$

$$g_{32}^f(p) = \frac{k_6}{p(T_6p + 1)}. \quad (11)$$

Результати проведеного дослідження засвідчили, що об'єкт по каналах $g_{11}(p)$, $g_{22}(p)$, $g_{21}^f(p)$, $g_{22}^f(p)$, $g_{32}(p)$, $g_{31}^f(p)$, $g_{32}^f(p)$ має змінні параметри, які залежать від режиму роботи установки. Експериментальні дані наведено у таблиці. Експериментально встановлено, що на процес знезалізнення технічних вод витрата рідини істотно не впливає. Тому можна прийняти $g_{21} \approx 0$.

Таким чином, залежність (1) з урахуванням (5)—(11) має наступний вигляд:

$$y = \begin{bmatrix} \frac{k}{p(Tp+1)} & 0 \\ 0 & \frac{k_{22}}{T_{22}p+1} \\ 0 & \frac{k_4}{p(T_4p+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_{21}}{T_{21}p+1} & \frac{k_3}{T_3p+1} \\ \frac{k_5}{p(T_5p+1)} & \frac{k_6}{p(T_6p+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{\text{вх}} \\ v \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Алгоритм керування та система автоматизації. При розробці алгоритму керування системою враховано наступні чинники:

система магнітного очищення повинна забезпечувати задану концентрацію залізовмісних домішок на виході при різних витратах технологічних вод;

Таблиця параметрів передаточних функцій

Параметр	Результат експерименту		
	0→25 м/год	0→30 м/год	0→35 м/год
k	0,17	0,26	0,34
T	1,7	2,0	2,2
k_3	0,52	0,77	0,98
T_3	1,4	1,1	0,9
k_6	1,43	1,45	1,45
T_6	0,2	0,3	0,4
	0→8 А	0→12 А	0→16 А
k_{22}	0,77	0,56	0,41
T_{22}	0,9	1,0	1,1
k_4	1,45	1,46	1,46
T_4	0,4	0,2	0,15
	0→2 мг/дм ³	0→4 мг/дм ³	0→6 мг/дм ³
k_{21}	0,77	1,16	1,54
T_{21}	1,9	1,1	0,8
k_5	1,36	1,42	1,44
T_5	0,3	0,4	0,5

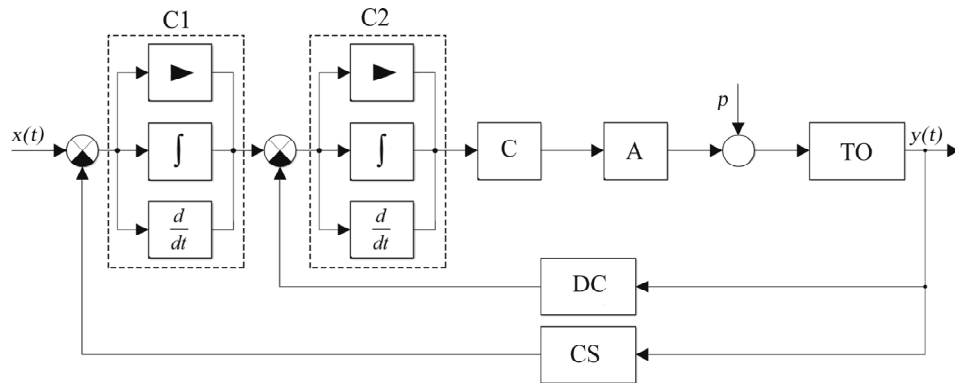


Рис. 6. Структурна схема алгоритму керування допустимою концентрацією домішок в стічних водах: C1 – стандартний пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор для розрахунку напруженості магнітного поля, прикладеного до електромагніту; C2 – системний ПІ диференціальний (ПІД) регулятор для підтримування заданої сили струму на відповідному рівні при порівнянні з реальним струмом, що протікає в колі живлення магнітного фільтра; C – регулюючий орган, яким в даній системі виступає контролер, що керує величиною прикладеної напруги від підсилювача до електромагніту; A – виконавчий механізм (підсилювач), який подає напругу на електромагніт; TO – технологічний об’єкт, яким є магнітний фільтр; DC – давач струму, який вимірює реальний струм, що протікає в колі живлення електромагніту; CS – давач концентрації залізовмісних домішок на вході в магнітний фільтр, який показує зміну вхідної концентрації для реалізації режиму керування; p – збурення

вхідна концентрація забруднення є змінним параметром і відповідно до кількості залізовмісних домішок регулюється напруженість магнітного поля;

напруженість магнітного поля повинна підтримуватися на заданому рівні з контролем сили струму в колі живлення;

регулятор повинен підтримувати напруженість магнітного поля пропорційно до рівня забруднення технологічних вод, щоб забезпечити мінімальні витрати електроенергії при дотриманні показників якості очищеної води.

З урахуванням викладеного розроблено структурну схему алгоритму керування (рис. 6), згідно з якою система працює наступним чином. Допустима концентрація забруднення $x(t)$ порівнюється з величиною вхідної концентрації CS і, якщо в систему поступає забруднення з концентрацією, яка перевищує встановлені допустимі норми, запускається система автоматизації.

На першому етапі величина вхідної концентрації забруднення подається на стандартний ПІ регулятор C1, який розраховує величину напруженості магнітного поля, необхідну для виникнення достатньої сили в магнітному фільтрі, щоб при проходженні всього шляху при заданій

швидкості потоку забезпечити допустиму концентрацію забруднення цільового компоненту на виході з очисної станції. Отримане значення порівнюється з силою струму, який протікає в колі живлення магнітного фільтра на даний момент. Величина різниці подається на стандартний ПІД регулятор С2, який перетворює вхідний струмовий сигнал на уніфікований напруговий 0...5 В, що керує підсилювачем. Всі описані дії відбуваються в контролері через обмін сигналами з візуалізацією програми керування відповідно до отриманих результатів.

Наступним етапом є передача сигналів керування від аналогового виходу контролера С на виконавчий механізм А, під'єднаний до мережі живлення 220 В змінної напруги, який виробляє сигнал постійної напруги 24 В великих струмів. Аналоговий сигнал із контролера надходить на аналоговий вхід підсилювача, який виробляє пропорційний сигнал на виході 24 В, що подається в коло живлення електромагніту. При такій напрузі у магнітному фільтрі виникає достатнє магнітне поле для затримання заданої концентрації залізовмісних домішок, які безпосередньо подають в систему магнітного очищення ТО. Підтримання на заданому рівні сили струму здійснюється давачем DC, який підтримує зворотній зв'язок з контролером.

Для апаратної реалізації даного проекту використано програмований логічний контролер S-7 300 підприємства «Siemens» з модулями розширення. З використанням Simatic Step7 Manager написано програму керування процесом при попередньому налаштуванні апаратного забезпечення контролера та створено символну таблицю, в якій описано всі входи, виходи, мітки з їх символними, апаратними іменами та коментарями.

Основними складовими програми є реалізація методу визначення і підтримування необхідної сили струму в колі живлення електромагніту. Для виконання поставленої задачі використано стандартний ПІД регулятор, який виконує функцію регулювання сили струму відповідно до напруженості магнітного поля. Розроблено також функціональний блок, який розраховує необхідну силу струму для ефективного затримання залізовмісних домішок при змінній концентрації забруднення, що надходить. Вхідними параметрами даного блоку є концентрація забруднення у технологічних водах та емпіричні коефіцієнти, які розраховуються за допомогою моделювання роботи системи в Matlab.

Всі функції регулювання та контролю основних параметрів у розробленій системі автоматизації виконує програмований логічний контролер S-7 300 підприємства «Siemens» з модулями розширення дискретних входів SM321, аналогових входів SM331 та дискретних виходів SM322, який при даній конфігурації має чотири аналогових входи, 16 дискретних входів і 16 дискретних виходів, що достатньо для керування даною

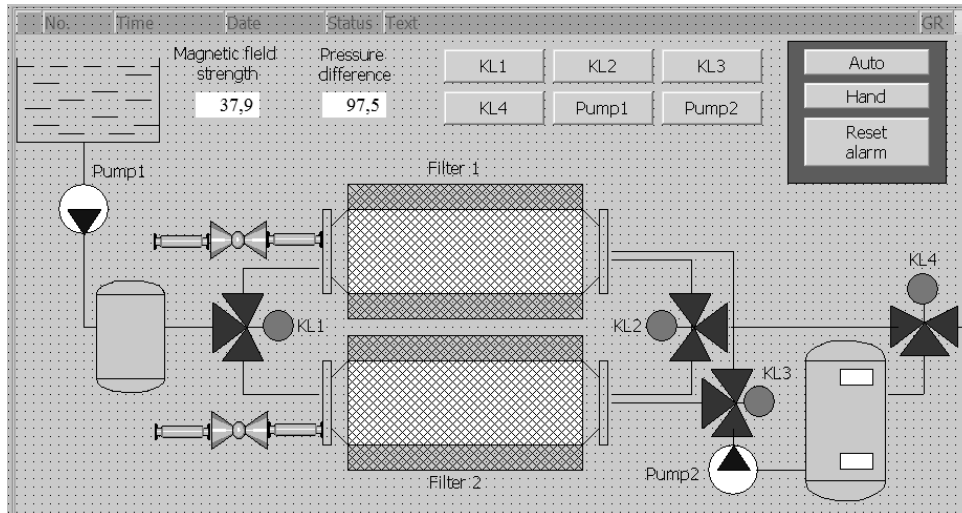


Рис. 7. Графічне вікно для відображення ходу технологічного процесу

системою. Для зв'язку контролера з персональним комп'ютером оператора та мережею контролерів використовується комунікаційний модуль CP343.

Дана система має два контури регулювання, які забезпечують на відповідному рівні такі технологічні параметри: концентрацію забруднення у рідкому середовищі і тиск технологічної води на виході з системи. Система також контролює тиск забрудненої води на вході фільтрів 1 і 2 (рис. 7). Для виявлення відхилень у технологічному процесі і у випадку відхилення критичних параметрів система дозволяє здійснити аварійну зупинку технологічного процесу перекиданням подачі забрудненої води відсічним клапаном.

Для відображення технологічного процесу у Scada-системі з використанням редактора представлення даних розроблено графічну частину проекту системи керування. Усі форми відображення інформації, керування і анімаційні ефекти зв'язані з інформаційною структурою, розробленою в Simatic Step7.

Для реалізації проекту створено графічний екран (див. рис. 7), на якому здійснюється автоматичне і ручне керування процесом, відображення помилок в роботі відповідних пристроїв, а також головних інформативних параметрів технологічного процесу таких, як напрямок потоку рідини через освітлення зеленим індикатором відповідних частин клапанів, насосів фільтрів, а також наведення даних про витрату води і перепад тиску в системі магнітних фільтрів.

Висновки

Розроблена установка дозволяє використовувати такі параметри, як довжина магнітного фільтра, діаметр гранульованих частинок, об'єм фільтруючої загрузки тощо, для керування процесом вилучення феромагнітних домішок. Запропонована математична модель процесу магнітного очищення технологічних вод і структурна схема зв'язків параметрів процесу вилучення феромагнітних домішок дали змогу провести комп'ютерний експеримент і визначити основні конструктивні параметри процесу, а саме час захисної дії фільтра при змінній концентрації феромагнітних домішок і перепад тиску, який виникає при цьому. Експериментально було встановлено, що на процес знезалізнення технічних вод витрата рідини істотно не впливає. Для автоматизації відповідного процесу знайдені перехідні характеристики об'єкта по каналах сила струму — концентрація домішок на виході, загальна концентрація забруднень в стічній воді — концентрація домішок на виході, загальна концентрація забруднень в стічній воді — концентрація домішок на виході, витрата — перепад тиску, сила струму — об'єм осаду забруднювача, загальна концентрація забруднень в стічній воді — об'єм осаду забруднювача та швидкість руху рідини — об'єм осаду забруднювача є реальною інтегруючою ланкою. Розроблена система автоматизації забезпечує задану концентрацію залізовмісних домішок на виході системи, а також дозволяє збільшити термін роботи технологічного обладнання та зменшити енергозатрати на процес регенерації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ksenofontov B.* Models of complex process of water purification. Second international conference on material science, smart structures and applications, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5140154>
2. *Terentiev O., Tkachuk K., Tverda O., Kleshchov A.* Electromagnetic focusing of impurities in water purification // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol 4, No 10(82), pp. 10—15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75251>.
3. *Tarasov N., Polyakov S., Kudryashova T.* Computation of 3D Water Flows by the Double Potential Method for the Simulation of Electromagnetic Water Purification // *The European Physical Journal Conferences*, 2020, Vol. 226. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022602021>.
4. *Li L., Greenberg P., Kenneth W., Chen D.* Study of a Magnetic Filter System for the Characterization of Particle Magnetic Property // *Journal Aerosol Science and Technology*, 2011, Vol. 45, Issue 3, pp. 327—335. <https://doi.org/10.1080/02786826.2010.534514>.
5. *Simonson R. M.* Magnetic filter and magnetic filtering assembly. Patent Application Publication. Pub. No.: US 2010/0294706 A1, Pub. Date: Nov. 25, 2010.
6. *McAllorum S., Martin K., Liptrot G.* Study of a Magnetic Filter System for the Characterization of Particle Magnetic Property. Patent Application Publication. Patent No.: US 9,669.414 B2, Date of Patent: Jun. 6, 2017.

7. Bomba A. Ya., Safonyk A., Fursachik E. Identification of Mass Transfer Distribution Factor and Its Account for Magnetic Filtration Process Modeling // *Journal of Automation and Information Sciences*, 2013, Vol. 45, Iss 4, pp. 16—22.
8. Сафоник А.П., Таргоній І.М., Пасічник В.А. Математичний аналіз параметрів і моделі процесу магнітного осадження домішок // *Вісник Інженерної академії України*, 2018, № 1, с. 105—110.
9. Сафоник А.П. Комп'ютерне моделювання та автоматизація процесу фільтрування та регенерації в магнітному фільтрі // Там же, 2015, № 1, с. 202—208.
10. Сафоник А.П., Куницький С.О. Модель процесу контактного знезалізнення води крізь пористе завантаження водоочисного фільтра // *Науковий вісник будівництва*, 2017, **90**, № 4, с. 188—193.
11. Сафоник А.П., Таргоній І.М. Моделювання та автоматизація процесу отримання коагулянту для освітлення та знебарвлення промислових стічних вод // *Електронне моделювання*, 2019, **41**, № 5, с. 17—34.
12. Сафоник А.П., Таргоній І.М. Комп'ютерне моделювання та автоматизація процесу магнітного очищення води // *Бионика интеллекта*, 2014, № 2(83), с. 117—122.
13. Сандуляк А.В., Сандуляк Д.А., Полискова М.Н. и др. О проблеме изучения магнитных свойств железистых примесей технологических сред // IV Международная научно-практическая конференция «Новые технологии и проблемы технических наук». Сб. науч. трудов. Московского технологического университета, 2017, № 4, с. 77—85.
14. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Гаращенко В.И. Электромагнитные фильтр-осадители: монография. Львов: Выща школа, 1982, 70 с.
15. Сандуляк А.В. Особенности магнитного фильтрования воды в циркуляционных системах электростанций // *Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика*. 1983, № 3, с. 90—93.
16. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Еришова В.А. Экспериментально-расчетное определение силовых и энергетических характеристик рабочих зон магнитных сепараторов // *Метрология: Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы*, 2012, № 2, с. 32—39.

Отримано 23.06.20

REFERENCES

1. Ksenofontov, B. (2019), “Models of complex process of water purification”, *the Proceeding of Second international conference on material science, smart structures and applications*. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5140154>.
2. Terentiev, O. (2016), “Electromagnetic focusing of impurities in water purification”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 4, no. 10(82), pp. 10-15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75251>.
3. Tarasov, N. (2020), “Computation of 3D Water Flows by the Double Potential Method for the Simulation of Electromagnetic Water Purification”, *The European Physical Journal Conferences*, Vol. 226. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022602021>.
4. Lin, Li. (2011), “Study of a Magnetic Filter System for the Characterization of Particle Magnetic Property”, *Journal Aerosol Science and Technology*, Vol. 45, Iss. 3, pp. 327-335. DOI: <https://doi.org/10.1080/02786826.2010.534514>.
5. Simonson, R.M. (2010), “Magnetic filter and magnetic filtering assembly”, *Patent Application Publication*, no. 0294706 A1.
6. McAllorum, S. (2017), “Study of a Magnetic Filter System for the Characterization of Particle Magnetic Property”, *Patent Application Publication*, no. 9, 669.414 B2.

7. Bomba, A.Ya. (2013), "Identification of mass transfer distribution factor and its account for magnetic filtration process modeling", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 45, Iss. 4, pp. 16-22.
8. Safonyk, A.P. (2018), "Mathematical analysis of parameters and models of the process of magnetic precipitation of houses", *Visnyk Inzhenernoi Akademii Ukrainy*, no. 1, pp. 105-110.
9. Safonyk, A.P. (2015), "Computer modeling and automation of the filter and regeneration process in the magnetic filter", *Visnyk Inzhenernoi Akademii Ukrainy*, no. 1, pp. 202-208.
10. Safonyk, A.P. (2017), "Model of the process of contacting the water and the porous sealing of the water filter", *Naukovyi Visnyk Budivnytstva*, Vol. 90, no. 4, pp. 188-193.
11. Safonyk, A.P. (2019), "Modeling and automation of the process of the obtaining a coagulant for clarification and discoloration of industrial wastewater", *Elektron. model*, Vol. 41, no. 5, pp. 17-34.
12. Safonyk, A.P. (2014), "Computer model and automation of the process of magnetic water purification", *Byonyka Yntellekta Nauch.-Tekhn. Zhurnal*, no. 2(83), pp. 117-122.
13. Sandulyak, A.V. (2017), "On the problem of studying the magnetic properties of ferrous impurities in technological media", *the Proceeding of the IV-th International scientific-practical conference "New technologies and problems of technical sciences". Sat. scientific works. Moscow Technological University*, 2017, pp. 77-85.
14. Sandulyak, A.V. (1982), *Elektromagnitnye fyltr-osadytely: monohrafiya* [Electromagnetic filter-precipitators: monograph], Lvov Vyshcha Shkola.
15. Sandulyak, A.V. (1983), Osobennosti mahnytnoho fyltrovaniya vody v tsyrkuliatsyonykh systemakh elektrostantsyi, *Izv. vuzov SSSR. Ser. Energetika*, no. 3, pp. 90-93.
16. Sandulyak, A.A., Sandulyak, A.V., Yershova, V.A. (2012), "Experimental and computational determination of the power and energy characteristics of the working zones of magnetic separators", *Metrologiya: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut metrologicheskoy sluzhby*, no. 2, pp. 32-39.

Received 23.06.20

А.П. Сафоник, И.Н. Таргоний, И.М. Грицюк

РАЗРАБОТКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОД ОТ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Рассмотрен процесс очистки технологических вод от ферромагнитных примесей. Разработана структурная схема связей параметров процесса извлечения ферромагнитных примесей, что позволило провести компьютерный эксперимент и определить основные конструктивные параметры процесса. На основе разработанной математической модели процесса обезжелезнения построена структурная схема алгоритма управления концентрацией ферромагнитных примесей процесса обезжелезнения технологических вод, позволяющая регулирование напряженности магнитного поля, приложенной к электромагниту, и поддержание заданной силы тока на соответствующем уровне. Предусмотрено автоматическое и ручное управление процессом отображения ошибок в работе соответствующих устройств, а также отображение главных информативных параметров технологического процесса в реальном времени с использованием SCADA — системы WinCC Flexible.

К л ю ч е в ы е с л о в а: моделирование, процесс очистки, ферромагнитные примеси, магнитная очистка, обезжелезнение, автоматизация, SCADA.

A.P. Safonyk, I.M. Targoniy, I.M. Hrytsiuk

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE ELECTROMAGNETIC
INSTALLATION FOR PURIFICATION OF PROCESS WATER
FROM FERROMAGNETIC IMPURITIES AS AN OBJECT OF AUTOMATION

The process of purification of process waters from ferromagnetic impurities is considered. The structural scheme of connections of parameters of the process of extraction of ferromagnetic impurity which has allowed carrying out computer experiments and to define the basic constructive parameters of the process is developed. Based on the developed mathematical model of the iron removal process, the structural scheme of the algorithm for controlling the concentration of ferromagnetic impurities during the purification of process water is constructed, which provides for the regulation of the magnetic field applied to the electromagnet and maintain a given current strength at the appropriate level. Automatic and manual process control, display of errors in work of the corresponding devices, and also display of the main informative parameters of technological process in real-time with the use of SCADA — WinCC Flexible system is provided.

Key words: modeling of water purification process from ferromagnetic impurities, magnetic purification, iron removal, automation, regulation, SCADA.

САФОНИК Андрій Петрович, д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій навчально-наукового Інституту автоматизації, кібернетики та обчислюваної техніки Національного університету водного господарства та природокористування. В 2004 р. закінчив Рівненський державний гуманітарний університет. Область наукових досліджень — моделювання та автоматизація природних, технологічних і техногенних процесів та систем.

ТАРГОНІЙ Іван Миколайович, мол. наук. співроб. науково-дослідної частини Національного університету водного господарства та природокористування, який закінчив в 2015 р. Область наукових досліджень — моделювання та автоматизація природних, технологічних і техногенних процесів та систем.

ГРИЦЮК Іванна Михайлівна, магістр кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій навчально-наукового Інституту автоматизації, кібернетики та обчислюваної техніки Національного університету водного господарства та природокористування, який закінчила в 2019 р. Область наукових досліджень — моделювання та автоматизація природних, технологічних і техногенних процесів та систем.