

Левчук І.Л.

Український державний університет науки і технологій

Дубовик Т.М.

Український державний університет науки і технологій

Гузь Г.М.

Український державний університет науки і технологій

Романчук О.О.

Український державний університет науки і технологій

РОЗРОБКА ЛЮДИНО-МАШИННОГО ІНТЕРФЕЙСУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ SCADA ПРОЦЕСОМ ОТРИМАННЯ МІДНОГО КУПОРОСУ

Метою даної роботи є створення в програмному середовищі SCADA ефективного людино-машинного інтерфейсу (НМІ) системи керування процесом отримання мідного купоросу. НМІ котрий в реальному часі інформує оператора про перебіг керованого процесу, дозволяє спостерігати значення всіх цільових технологічних змінних в цифровій та графічній формі, дає можливість здійснювати ручне керування процесом та налаштовувати алгоритми керування. В статті наведена стисла характеристика основних параметрів комп'ютерної моделі процесу отримання мідного купоросу реалізованої в універсальній моделюючій програмі CHEMCAD, котрі взаємодіють з елементами людино-машинного інтерфейсу реалізованого на базі SCADA. Представлена загальна структура та вигляд запропонованого НМІ, котрий складається з інформаційної панелі для відображення основних параметрів процесу в цифровій формі, панелі налаштування дозаторів призначеної для налаштування алгоритмів керування дозаторами та меж дозування, трендів для виводу в графічній формі основних цільових параметрів процесу а також трендів що у графічному вигляді відображають роботу підсистеми дозування. Розглянуті особливості створення та налаштування окремих елементів людино-машинного інтерфейсу (трендів) та наведений перелік і стисла характеристика всіх аргументів – змінних людино-машинного інтерфейсу, котрі забезпечують його функціонування та інформаційний обмін між елементами НМІ. Працездатність запропонованого НМІ перевірена і доведена шляхом порівняння отриманих перехідних характеристик процесу з даними реальної лабораторної установки для отримання розчину мідного купоросу. Наведений в статті аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновок про повну функціональність розробленого НМІ та досягнення мети роботи. Запропоновані в роботі технічні рішення, принципи та особливості розробки людино-машинного інтерфейсу мають універсальний характер і можуть застосовуватись для розробки або удосконалення систем керування подібними технологічними процесами, що побудовані на базі SCADA та математичних або комп'ютерних моделей.

Ключові слова: система керування, людино-машинний інтерфейс, SCADA, мідний купорос.

Постановка проблеми. Сучасне промислове виробництво не можливо без всебічного використання сучасних автоматизованих інформаційно-керуючих систем, котрі підвищують техніко-економічні показники керованих процесів, збільшують надійність роботи технологічного обладнання, поліпшують умови роботи персоналу та підвищують загальну ефективність і безпеку технологічних процесів. В той же час статистика аварій та інцидентів у промисловості,

на транспорті, в складних автоматизованих системах свідчить, що доля «людського фактору» у первопричинах інцидентів безперервно зростає [1]. Причиною вказаних тенденцій є постійне удосконалення та збільшення надійності сучасних засобів автоматизації та використання застарілого підходу при розробці систем керування – часто розробники спрямовують увагу на розширення функціональних можливостей систем керування, намагаються підвищити ступінь

автоматизації, концентруються на застосуванні новітніх технічних досягнень і недооцінюють необхідність побудови ефективного людино-машинного інтерфейсу (HMI – Human-Machine Interface), тобто інтерфейсу спрямованого на взаємодію системи керування з оператором. Саме SCADA, забезпечуючи потужні можливості для розробки людино-машинних інтерфейсів систем керування, є осередком нового підходу при розробці автоматизованих систем, підходу спрямованого на людину-оператора та його задачі [2].

Сульфат міді (мідний купорос) є найважливішою сіллю міді, яка знаходить широке застосування в медицині, хімічній промисловості та сільському господарстві [3]. Продуктивність процесу отримання мідного купоросу значною мірою залежить від ефективності системи управління, для реалізації якої на базі SCADA потрібна математична модель процесу та система керування у складі:

1. Алгоритмів керуючої підсистеми;
2. Людино-машинного інтерфейсу системи керування;
3. Підсистеми зв'язку, що забезпечує інформаційний обмін в реальному часі між всіма компонентами системи керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розроблена комп'ютерна модель динаміки процесу отримання розчину мідного купоросу, адаптована для вирішення задач керування розглянута у роботі [4]. Модель реалізована в програмному середовищі універсальної моделюючої програми CHEMCAD, котра має вбудований OPC сервер та дозволяє здійснювати інформаційний обмін в реальному часі між моделлю та зовнішнім (по відношенню до моделі) програмним середовищем. Адекватність отриманої моделі авторами [4] перевірена та доведена шляхом порівняння отриманих результатів з даними реальної лабораторної установки. Принципи побудови зв'язку на базі технології OPC між комп'ютерною моделлю процесу реалізованою у CHEMCAD та системою керування на базі SCADA, зв'язку що забезпечує інформаційний обмін в реальному часі, розглянуті в роботі [5]. При проведенні дослідження автори [5] запропонували вирішення проблеми блокування інформаційного обміну до закінчення розрахунку комп'ютерної моделі шляхом запуску розрахункового процесу у квазідинамічному режимі.

Постановка завдання. Метою статті є розробка ефективного людино-машинного інтер-

фейсу (HMI) системи керування на базі SCADA процесом отримання мідного купоросу, здатного вирішувати наступні задачі:

- надання оператору системи керування необхідної інформації про перебіг керованого технологічного процесу в зрозумілій людині формі (у вигляді цифрових значень на дисплеї керуючої ЕОМ, та у вигляді графічних залежностей, котрі показують зміну цільового технологічного параметра – тобто трендів);
- надання оператору системи керування можливості відстежувати стан системи керування, перемикаючи режими роботи підсистеми регулювання (включати автоматичний або ручний режим роботи), здійснювати ручне керування процесом, тобто вручну керувати виконавчими пристроями та обирати відсоток їх відкриття, змінювати завдання та налаштування регуляторів, що здійснюють безпосереднє керування процесом.

Виклад основного матеріалу. До параметрів, котрі характеризують перебіг процесу отримання розчину мідного купоросу належать [4]:

- вміст сульфату міді CuSO_4 в реакційному розчині в реакторі, грам/літр;
- вміст кислоти H_2SO_4 в реакційному розчині в реакторі, грам/літр;
- щільність розчину в реакторі, грам/см³, при досягненні щільності 1,42 грам/см³ починається відбір реакційного розчину на кристалізацію;
- температура реакційної суміші в реакторі, °С;
- об'єм рідини в реакторі, літрів.

До параметрів, що забезпечують функціональні можливості оператора системи належать:

- завдання максимального ступеня відкриття виконавчих пристроїв, 0–100%;
- завдання максимального та мінімального об'єму рідини в реакторі, при котрому зберігається нормальний перебіг технологічного процесу та в межах котрої працює система адаптивного дозування, 3–4,5 літрів;
- налаштування щільності розчину в реакторі, при досягненні якої відбувається відбір розчину на кристалізацію, грам/см³;
- перемикання режиму функціонування дозаторів, ручний або автоматичний;
- індикація стану (відсоток відкриття) виконавчих пристроїв «6» та «9», %;
- індикація стану системи дозування, відбір розчину чи додавання для відновлення об'єму рідини в реакторі та кислотності реакційного середовища.

Для вирішення поставлених задач в програмному середовищі SCADA системи були розроблені елементи НМІ котрі надають оператору системи керування інформацію про перебіг процесу отримання розчину мідного купоросу в цифровій формі та дозволяють відстежувати стан системи адаптивного дозування та за необхідності змінювати налаштування регуляторів, що безпосередньо керують процесом в автоматичному режимі – інформаційна панель процесу, та панель керування дозаторами.

Розроблені елементи НМІ наведені на рисунку 1 та 2.

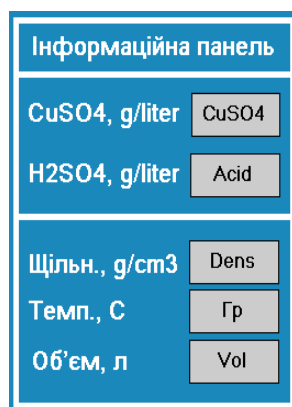


Рис. 1.
НМІ, інформаційна
панель процесу

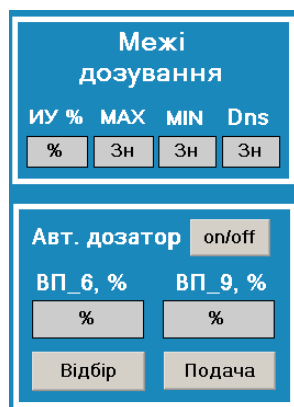


Рис. 2.
НМІ, панель керування
дозаторами

Інформаційна панель процесу забезпечує відображенню в цифровій формі з зазначенням одиниць вимірювання вмісту CuSO_4 та H_2SO_4 в реакційному розчині, щільність та температуру розчину, об'єм рідини в реакторі.

Налаштування параметрів регуляторів здійснюється шляхом натискання лівої кнопки маніпулятора «миша» в області відображення поточного значення відповідного параметра, після чого відкриється вікно в якому оператор системи може задати нове значення параметра (рис. 3).

Перемикання режимів функціонування регуляторів і ручний початок та закінчення дозування реалізовано за допомогою графічних кнопок розташованих у відповідній області НМІ (кнопки «on/off» та «Відбір»–«Подача»). Для відображення стану підсистеми дозування використана кольорова індикація, при задіянні функції відповідна кнопка стає червоною (рис. 3).

Розроблений НМІ надає можливість відстежувати найбільш критичні цільові параметри процесу в динаміці та в графічній формі в залежності від астрономічного часу, тобто у вигляді графіків – трендів.

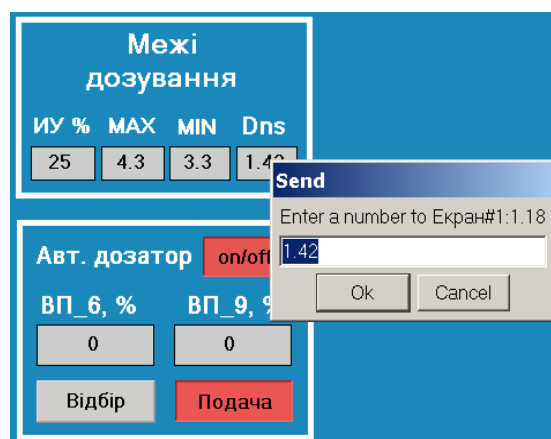


Рис. 3. НМІ, налаштування параметрів регуляторів

Відображенню у вигляді трендів підлягають:

- вміст сульфату міді CuSO_4 в розчині;
- вміст кислоти H_2SO_4 в розчині;
- щільність розчину;
- об'єм рідини в реакторі «1».

Для оптимального використання робочого простору екрану НМІ, близькі за суттю параметри процесу згруповані попарно на одних координатних осях, «Купорос та кислота» (рис. 4) та «Рідина в реакторі, щільність» (рис. 5).

Діапазони значень по осям встановлені у відповідності до максимальних та мінімальних значень відповідних технологічних параметрів, тобто з урахуванням можливого діапазону зміни цих параметрів на виході комп'ютерної моделі. Вміст сульфату міді CuSO_4 в реакційному розчині «Купорос»: 0–600 грам/літр, вміст кислоти H_2SO_4 в реакційному розчині «Кислота»: 0–250 грам/літр; щільність реакційного розчину «Щільність»: 1.15–1.65 грам/см³, об'єм рідини в реакторі «Рідина»: 2,5–4,5 літрів.

На рис. 6 наведені налаштування програмного середовища SCADA-системи TRACE MODE (написи, кольори ліній, масштаб за параметром та часом, алгоритм інтерполяції значень та ін.), котрі забезпечують функціонування тренду «Купорос та кислота».

Для забезпечення відображення тренду у вигляді нерозривної кривої та проведення лінії від поточного значення каналу до значення каналу на попередньому кроці обробки, обраний метод інтерполяції значень «За періодом реального часу». Аналогічно налаштовується тренд «Рідина в реакторі, щільність».

Підсистема аргументів (внутрішніх змінних) SCADA, що забезпечує інформаційний обмін між всіма елементами розробленого людино-машин-

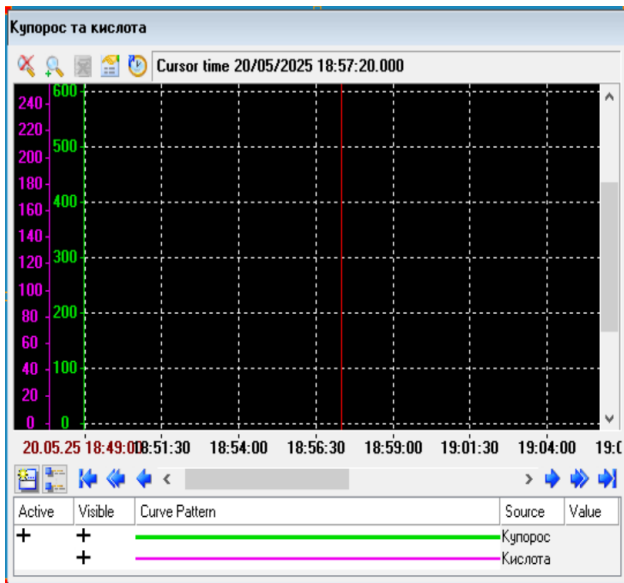


Рис. 4. HMI, тренд «Купорос та кислота»

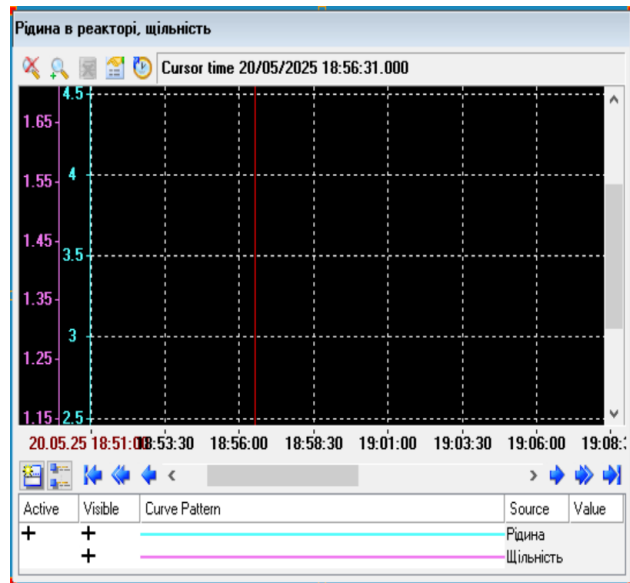


Рис. 5. HMI, тренд «Рідина в реакторі, щільність»

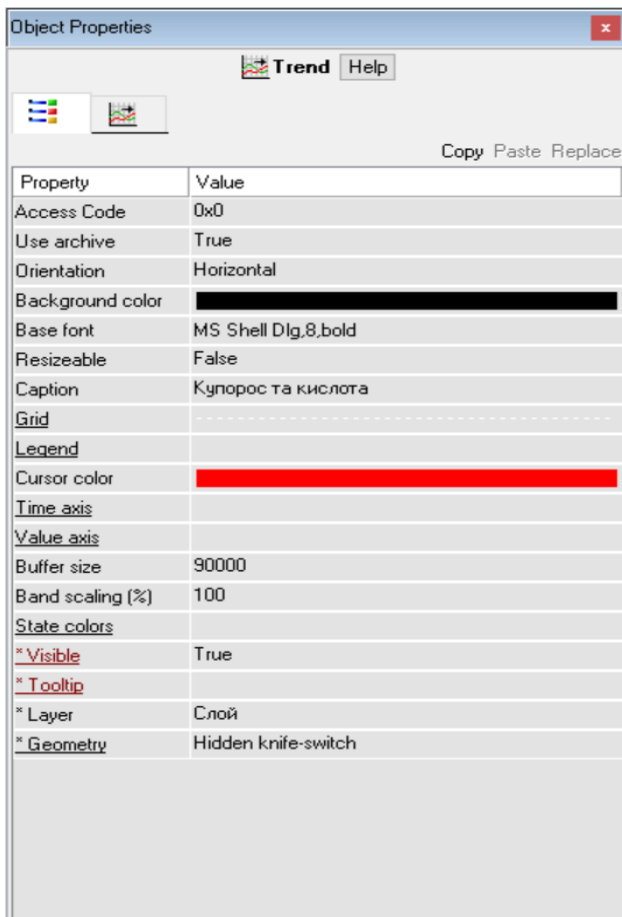
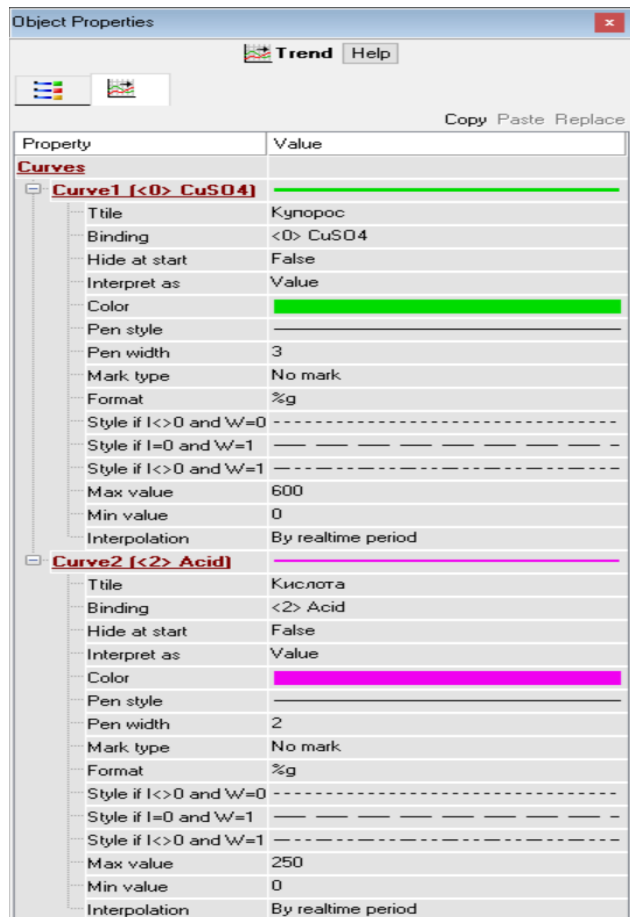


Рис. 6. Налаштування тренду «Купорос та кислота»

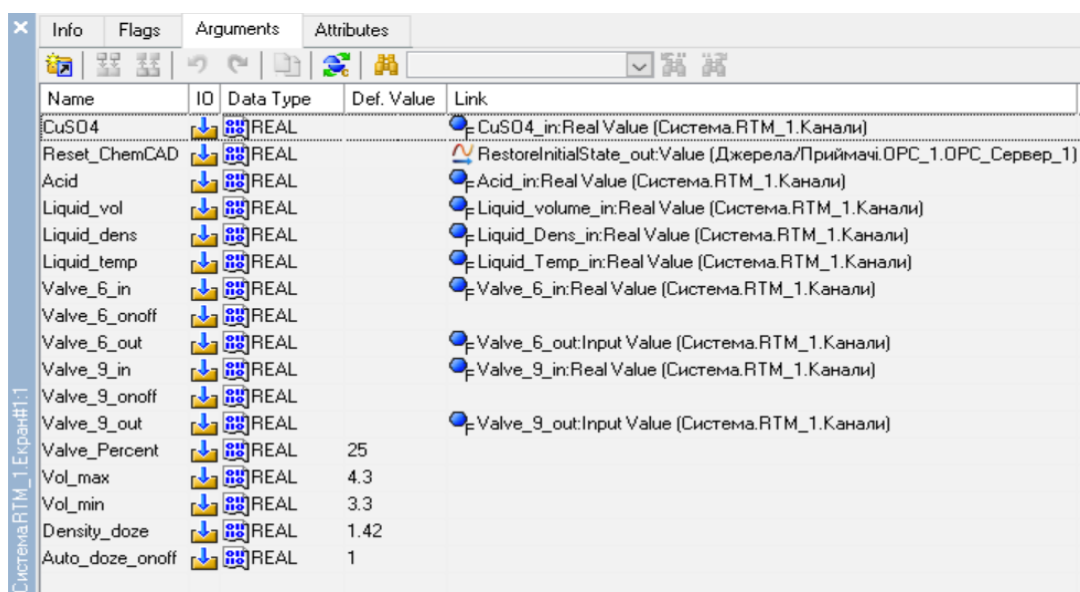


ного інтерфейсу системи керування процесом отримання мідного купоросу та всіма її підсистемами в реальному часі наведена на рисунку 7.

Аргументи CuSO₄, Acid, Liquid_vol, Liquid_dens, Liquid_temp відповідають за вміст сульфату

міді, кислоти та об'єм, щільність і температуру розчину в реакторі.

Призначенням аргументів Valve_... є зв'язок з виконавчими пристроями, встановлення та моніторинг за допомогою зворотного зв'язку



Name	IO	Data Type	Def. Value	Link
CuSO4		REAL		[-] CuSO4_in:Real Value (Система.RTM_1.Канали)
Reset_ChemCAD		REAL		[-] RestoreInitialState_out:Value (Джерела/Приймачі.OPC_1.OPC_Сервер_1)
Acid		REAL		[-] Acid_in:Real Value (Система.RTM_1.Канали)
Liquid_vol		REAL		[-] Liquid_volume_in:Real Value (Система.RTM_1.Канали)
Liquid_dens		REAL		[-] Liquid_Dens_in:Real Value (Система.RTM_1.Канали)
Liquid_temp		REAL		[-] Liquid_Temp_in:Real Value (Система.RTM_1.Канали)
Valve_6_in		REAL		[-] Valve_6_in:Real Value (Система.RTM_1.Канали)
Valve_6_onoff		REAL		
Valve_6_out		REAL		[-] Valve_6_out:Input Value (Система.RTM_1.Канали)
Valve_9_in		REAL		[-] Valve_9_in:Real Value (Система.RTM_1.Канали)
Valve_9_onoff		REAL		
Valve_9_out		REAL		[-] Valve_9_out:Input Value (Система.RTM_1.Канали)
Valve_Percent		REAL	25	
Vol_max		REAL	4.3	
Vol_min		REAL	3.3	
Density_doze		REAL	1.42	
Auto_doze_onoff		REAL	1	

Рис. 7. HMI, аргументи (внутрішні змінні)

положення регулюючих органів, встановлення відсотку відкриття або закриття виконавчих пристроїв.

Аргументи Density_doze, Auto_doze, Vol_max та Vol_min використовуються для налаштування алгоритму адаптивного дозування, котрий не розглядається у межах цієї роботи.

За допомогою розділу «Def. Value» за потреби для аргументів задаються значення за замовчуванням. У розділі «Link» задається джерело, з якого аргумент отримує дані – інформаційний канал, або інший аргумент HMI.

Загальний вигляд розробленого людино-машинного інтерфейсу системи керування процесом отримання розчину мідного купоросу наведений на рисунку 8.

Вільний простір між блоками налаштувань «Інформаційна панель» та «Межі дозування» в майбутньому планується використати для розміщення налаштувань підсистеми керування температурою реакційного розчину в реакторі при продовженні даного дослідження в напрямку визначення впливу температури на перебіг процесу отримання розчину мідного купоросу. Реалізована на зараз система керування забезпечує ведення процесу при постійній, рекомендованій в довідковій літературі [6] температурі біля 80°C.

Для перевірки працездатності розробленого людино-машинного інтерфейсу системи керування процесом отримання мідного купоросу був виконаний тестовий «прогін» розробленої системи та отримані перехідні характеристики керованого процесу. Також виконаний порівняльний аналіз отриманих залежностей з даними реальної

лабораторної установки для отримання розчину мідного купоросу, котра працює в «НДІ Метрологічного забезпечення екологічного контролю зовнішнього середовища» ННІ УДХТУ, УДУНТ.

Графічні залежності (тренди), котрі демонструють зміну цільових параметрів процесу (вміст CuSO₄ та H₂SO₄) у часі наведені на рисунку 9.

Аналіз отриманих результатів. Отримані та наведені на рисунку 9 залежності повністю відтворюють поведінку реального процесу отримання мідного купоросу. На початку технологічного процесу вміст кислоти в реакторі перевищує вміст купоросу, котрий доданий в реактор лише для підтримання реакції, відповідно H₂SO₄ = 188,37 грам/літр, CuSO₄ = 157,203 грам/літр. Але з часом у наслідок хімічних перетворень вміст кислоти зменшується а мідного купоросу зростає, відповідно зростає і щільність розчину в реакторі. На початок відбору рідини на кристалізацію концентрації дорівнюють H₂SO₄ = 49,58 грам/літр, CuSO₄ = 514,57 грам/літр. Відновлення об'єму рідини в реакторі шляхом додавання розчину 20% H₂SO₄ призводить до часткового відтворення кислотності розчину (H₂SO₄ = 96,68 грам/літр) та до зниження вмісту мідного купоросу (CuSO₄ = 359,39 грам/літр). Після чого робочий цикл установки для отримання розчину мідного купоросу повторюється.

З графіку перехідних процесів видно (рис. 9), що з кожним робочим циклом вміст кислоти в реакційному розчині знижується. Це цілком відповідає реальному процесу і пояснюється не



Рис. 8. НМІ системи керування, загальний вигляд

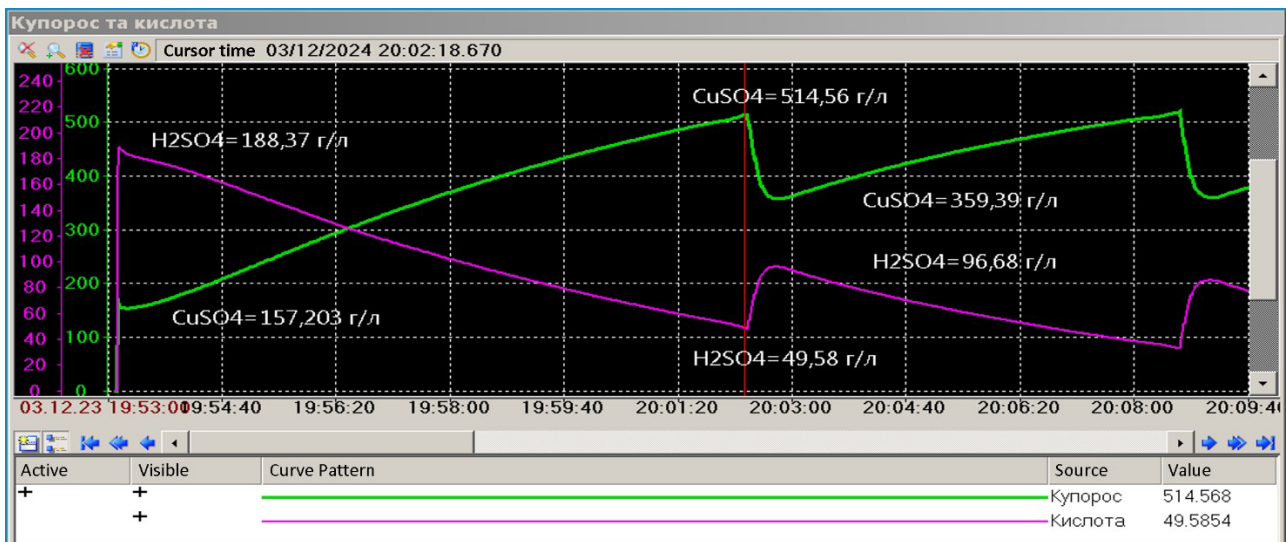


Рис. 9. Перехідні характеристики процесу

можливістю повністю відновити вміст H₂SO₄ відбираючи лише частину, а не весь вміст реактору на кристалізацію. Частина розчину, завжди залишають в реакторі для прискорення хімічних перетворень в наступному робочому циклі, що можливо лише при наявності в реакційному розчині невеликого вмісту CuSO₄.

Збільшення об'єму розчину, котрий відбирається на кристалізацію, з одного боку збільшує повторюваність параметрів робочих циклів установки, відповідно збільшуючи загальну тривалість роботи, до повної заміни реакційної суміші, що є позитивним явищем. Але визначення точного співвідношення об'єму відбору та об'єму

рідини що повинен залишається в реакторі, з урахуванням поточного вмісту CuSO_4 потребує подальших досліджень.

Промислові установки для отримання розчину мідного купоросу працюють 2–3 робочі цикли, після чого відбувається повна заміна відпрацьованого мідного брухту та реакційної суміші в реакторі.

Висновки. В статті розглянуті принципи побудови та основні етапи розробки ефективного людино-машинного інтерфейсу (НМІ) системи керування процесом отримання мідного купо-

росу. Розроблений НМІ в реальному часі надає оператору інформацію про перебіг процесу, дозволяє спостерігати значення всіх цільових технологічних змінних в цифровій та графічній (у вигляді трендів) формі, дозволяє оператору виконувати налаштування алгоритмів керування та за необхідності здійснювати ручне керування процесом. Працездатність розробленого НМІ перевірена та доведена шляхом порівняльного аналізу отриманих перехідних характеристик процесу з даними отриманими з реальної лабораторної установки.

Список літератури:

1. Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій : зб. наук. пр. / наук. ред. О. Г. Байбуз. Дніпро. 2016. Т. 20. 105 с.
2. Маслов В., Сачков І. Актуальні проблеми автоматизації в сучасному світі. *Вісник науки і освіти*. 2019. № 2 (56). С. 381.
3. Селевцов Л. І. Автоматизація технологічних процесів. Київ : Вид. центр «Акад.», 2014. 352 с.
4. Розробка комп'ютерної моделі процесу отримання розчину мідного купоросу, адаптованої для розв'язання задач управління / І. Левчук та ін. *Вісник ХНУ*. 2021. № 4(299). С. 59–66.
5. Моделювання хіміко-технологічних процесів у SCADA за допомогою технології OPEN PLATFORM COMMUNICATIONS / І. Левчук та ін. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 2. С. 59–66.
6. Justel F. J., Taboada M. E., Jimenez Y. P. Thermodynamic study of the Cu-Na-H-SO₄-Cl-HSO₄-H₂O system for the solubility of copper sulfate in acid seawater at different temperatures. *Journal of Molecular Liquids*. 2018. No. 249. P. 702–709.

Levchuk I.L., Dubovyk T.M., Huz H.M., Romanchuk O.O. DEVELOPMENT OF A HUMAN-MACHINE INTERFACE FOR A CONTROL SYSTEM BASED ON SCADA FOR THE COPPER SULFATE PRODUCTION PROCESS

The purpose of this work is to create an effective human-machine interface (HMI) for the control system of the copper sulfate production process in the SCADA software environment. HMI, which informs the operator in real time about the progress of the controlled process, allows you to observe the values of all target technological variables in digital and graphical form, makes it possible to manually control the process and configure control algorithms. The article provides a brief description of the main parameters of the computer model of the copper sulfate production process implemented in the universal modeling program CHEMCAD, which interact with the elements of the human-machine interface implemented on the basis of SCADA. The general structure and appearance of the proposed HMI, which consists of an information panel for displaying the main process parameters in digital form, a batcher configuration panel designed to configure batcher control algorithms and dosing limits, trends for displaying the main target process parameters in graphic form, as well as trends that graphically display the operation of the dosing subsystem. The features of creating and configuring individual elements of the human-machine interface (trends) are considered and a list and brief description of all arguments – variables of the human-machine interface, which ensure its functioning and information exchange between HMI elements are given. The operability of the proposed HMI is checked and proven by comparing the obtained transient characteristics of the process with the data of a real laboratory installation for obtaining a solution of copper sulfate. The analysis of the obtained dependencies presented in the article allows us to conclude about the full functionality of the developed HMI and the achievement of the goal of the work. The technical solutions, principles and features of the development of the human-machine interface proposed in the work are universal in nature and can be used to develop or improve control systems for similar technological processes that are built on the basis of SCADA and mathematical or computer models.

Key words: control system, human-machine interface, SCADA, copper sulfate.