

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-47>
УДК 004.942

ЛЕВЧУК ІГОР

Український державний університет науки і технологій
<https://orcid.org/0000-0002-8983-0558>
e-mail: LiL8192@gmail.com

ДУБОВИК ТЕТЯНА

Український державний університет науки і технологій
<https://orcid.org/0000-0002-2359-2569>
e-mail: tetyana_dubovik@udhtu.edu.ua

ГУЗЬ ГАННА

Український державний університет науки і технологій
<https://orcid.org/0009-0002-2908-8985>
e-mail: h.m.huz@ust.edu.ua

РОМАНЧУК ОЛЕКСАНДР

Український державний університет науки і технологій
<https://orcid.org/0000-0003-2623-350X>
e-mail: aaromanchuk1991@gmail.com

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОТРИМАННЯ МІДНОГО КУПОРОСУ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ SCADA

Метою даної роботи є створення в середовищі SCADA програмної структури системи керування процесом отримання мідного купоросу, у складі системи інформаційних каналів та внутрішніх змінних котрі забезпечують роботу людино-машинного інтерфейсу та дозволяють інформувати оператора про перебіг технологічного процесу, спостерігати значення всіх цільових технологічних параметрів у реальному часі в цифровій та графічній формі, дають можливість здійснювати ручне керування процесом та налаштовувати алгоритми керування.

В статті наведена загальна структура програмного забезпечення розробленої системи керування процесом отримання мідного купоросу, котра реалізована на базі комп'ютерної моделі процесу створеної у програмному середовищі універсальної моделюючої програми CHEMCAD. Для обміну інформацією в реальному часі між комп'ютерною моделлю процесу та системою керування застосовується технологія OPC. Розглянуті основні етапи та особливості створення та налаштування системи інформаційних каналів та внутрішніх системи керування процесом у програмному середовищі SCADA системи TRACE-MODE, а саме: наведена характеристика запропонованої програмної структури та всіх її блоків, визначене функціональне призначення основних вхідних та вихідних інформаційних каналів системи керування, котрі використовуються для забезпечення інформаційного обміну з сервером OPC; наданий перелік, функціональне призначення та характеристика системних змінних SCADA, котрі забезпечують інформаційний обмін в реальному часі між частками системи (інформаційні канали, HMI, алгоритми керуючої підсистеми). Виконана перевірка працездатності запропонованої структури програмного забезпечення та людино-машинного інтерфейсу системи керування на базі SCADA процесом отримання мідного купоросу, отримані перехідні характеристики процесу, достовірність яких перевірена шляхом порівняння з даними реальної лабораторної установки.

Запропоновані в роботі технічні рішення, принципи та особливості розробки структури програмного забезпечення системи керування процесом отримання мідного купоросу 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 моделях.

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

LEVCHUK IHOR, DUBOVYK TETYANA, HUZ HANNA, ROMANCHUK OLEKSANDR

Ukrainian State University of Science and Technology

DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE STRUCTURE OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE COPPER SULPHATE PRODUCTION PROCESS IN THE SCADA SOFTWARE ENVIRONMENT

The purpose of this work is to create a software structure of the copper sulfate production process control system in the SCADA environment, consisting of a system of information channels and internal variables that ensure the operation of the human-machine interface and allow the operator to be informed about the course of the technological process, observe the values of all target technological parameters in real time in digital and graphical form, and make it possible to manually control the process and configure control algorithms.

The article presents the general software structure of the developed copper sulfate production process control system, which is implemented on the basis of a computer model of the process created in the software environment of the universal modeling program CHEMCAD. OPC technology is used to exchange information in real time between the computer model of the process and the control system. The main stages and features of creating and configuring the information channel system and the internal process control system in the SCADA software environment of the TRACE-MODE system are considered, namely: the characteristics of the proposed software structure are given, the functional purpose of the main input and output information channels of the control system, which are used to ensure information exchange with the OPC server, are determined; a list, functional purpose and characteristics of SCADA system variables are provided, which ensure real-time information exchange between system components (information channels, HMI, control subsystem algorithms). The operability of the proposed software structure and the human-machine interface of the SCADA-based control system for the process of obtaining copper sulfate are checked, transient characteristics of the process are obtained, the reliability of which is verified by comparison with data from a real laboratory installation.

The technical solutions, principles and features of the development of the software structure of the control system for the copper sulfate production process 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.

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

Стаття надійшла до редакції / Received 06.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.05.2025

Вступ

SCADA – одна з найбільш сучасних та перспективних технологій у світі промислової автоматизації у наш час [1]. Завдяки підтримці сучасних мов програмування PLC, можливості отримувати інформацію з різноманітних технічних засобів та створювати інформативні та зрозумілі людино-машинні інтерфейси, системи керування на базі SCADA демонструють неперевершену ефективність та надійність при виконанні покладених на них функцій. У той же час на етапі впровадження та налаштування будь яка система керування, у тому числі на базі SCADA, вимагає зупинки технологічного процесу. Причому час зупинки може бути досить тривалим і його складно прогнозувати.

Для рішення цієї проблеми зазвичай застосовуються математичні моделі технологічних процесів, котрі дозволяють виконувати всі потрібні дії (підбір налаштувань алгоритмів керування, налаштування елементів людино-машинного інтерфейсу, перевірку працездатності розробленої системи та ін.) без залучення реального технологічного процесу. Моделі невеликої складності створюються безпосередньо у програмному середовищі SCADA, на мові програмування ST (Structured Text) або FBD (Functional Block Diagram). Для розробки складних с точки зору математики моделей технологічних процесів, використовують сучасні мови програмування високого рівня – C++, Python та ін. Отримані моделі під'єднуються до SCADA у вигляді зовнішнього модуля [2]. Однак створення точних та адекватних математичних моделей технологічних процесів є складною науково технічною задачею, котра також вимагає багато часу та ресурсів. Тому в останні роки для вирішення цієї проблеми поширення набули комп'ютерні моделі, створені в універсальних моделюючих програмах, таких як CHEMCAD, HYSYS, Aspen Plus та ін. Ці програмні пакети дозволяють збирати модель технологічного процесу з окремих апаратів-блоків як конструктор, з можливістю тонкого налаштування кожного блоку для врахування особливостей конкретного технологічного процесу [3].

Метою даної роботи є: створення в середовищі SCADA системи TRACE-MODE програмної структури та ефективного людино-машинного інтерфейсу системи керування процесом отримання мідного купоросу. При цьому математична модель процесу реалізована в універсальній моделюючій програмі CHEMCAD, а для інформаційного зв'язку моделі та системи керування в реальному часі використовується технологія OPC [4].

Результати дослідження

Стислий опис технологічного процесу отримання розчину мідного купоросу та особливості реалізації комп'ютерної моделі динаміки цього процесу у програмному середовищі універсальної моделюючої програми CHEMCAD, а також принципи реалізації інформаційного обміну між моделлю та системою керування в реальному часі за допомогою технології OPC (Open Platform Communication) наведені у публікаціях [3,4].

Розроблена структура програмного забезпечення системи керування представлена на рис. 1 та дозволяє здійснювати двосторонній інформаційний обмін між основними програмними компонентами (модель, внутрішні змінні SCADA, HMI, підсистема керування дозаторами) в реальному часі.

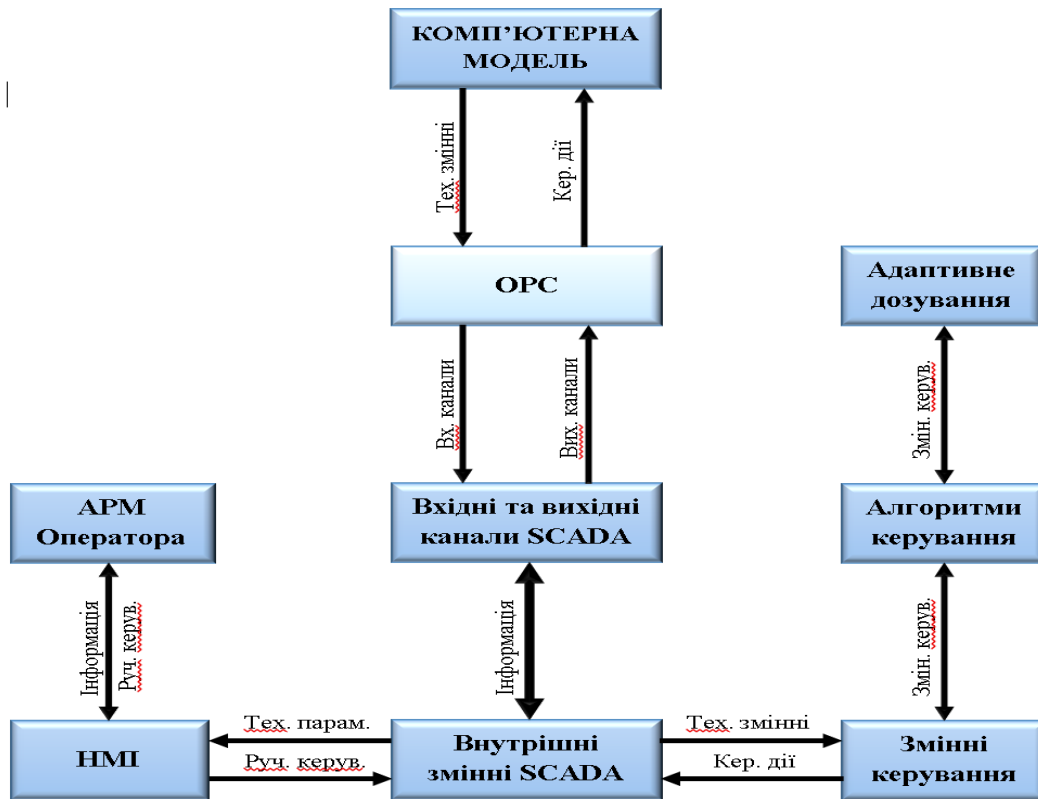


Рис. 1. Структура програмного забезпечення системи керування

На рис.1 використані наступні скорочення та умовні позначення:

- «Тех. змінні» - технологічні змінні, котрі описують цільові параметри керованого процесу (температура, щільність, об'єм, вміст кислоти або сульфату міді в розчині та ін.);
- «Кер. дії» - керуючі дії, значення котрі надходять на виконавчі пристрої та забезпечують відповідний відсоток їх відкриття;
- «Вх. канали» - вхідні канали SCADA, інформаційні структури за допомогою яких SCADA отримує інформацію з зовнішнього світу (датчики, контролери та ін.);
- «Вих. канали» - вихідні канали SCADA, інформаційні структури за допомогою яких SCADA передає інформацію до зовнішніх споживачів (контролери, виконавчі пристрої та ін.);
- «Тех. парам.» - технологічні параметри, це технологічні змінні адаптовані до сприйняття їх людиною, тобто переведені у відповідні одиниці вимірювання, масштабовані та ін.;
- «Руч. керув.» - ручне керування, змінні системи пов'язані з функціоналом ручного керування, тобто змінні котрі перемикають режими функціонування, вмикають або вимикають алгоритми керування;
- «Змін. керув.» - змінні керування, змінні котрі забезпечують роботу алгоритмів керуючої підсистеми;
- «APM Оператора» - автоматизовано робоче місце оператора системи керування, обладнане необхідними технічними засобами для здійснення оператором всіх його функцій (дисплей, монітор та ін. для отримання оператором інформації; клавіатура, миша, трекбол, тачпад та ін. для забезпечення можливості ручного керування; дзвоник, сирена, акустична система та ін. для звукового інформування оператора про настання аварійних або нештатних ситуацій, та ін.).

Розроблена та представлена на рис. 1 структура програмного забезпечення системи керування є універсальною та може бути використана для опису функцій, структури та принципів інформаційної взаємодії будь якої сучасної SCADA-системи з зовнішньою комп'ютерною моделлю будь якого технологічного процесу.

Дерево проекту реалізоване у програмному середовищі SCADA TRACE MODE наведено на рис. 2.

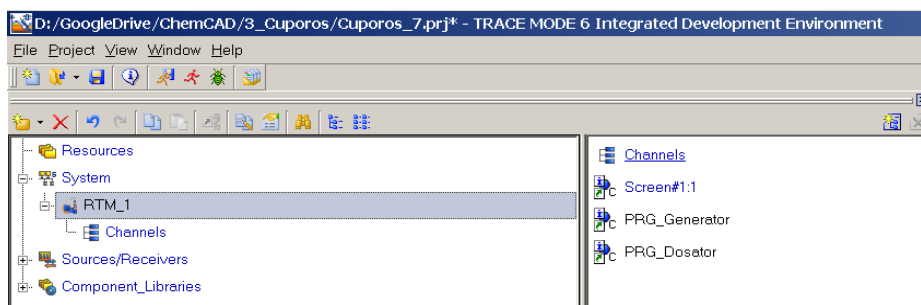


Рис. 2. Дерево проекту

Дерево проекту містить «Resources» - ресурси, «System» - систему проекту (зі створеним вузлом APM RTM_1) до складу якого входить розділ «Channels» - канали, та групи «Sources/Receivers» - джерела/приймачі та «Component_Libraries» - бібліотеки компонентів. У правій частині дерева проекту розташовані:

«Channels» - інформаційні канали для забезпечення інформаційного обміну між системою керування в SCADA та зовнішнім світом в розділі RTM_1 > Channels були створені вхідні (In) та вихідні (Out) інформаційні канали, показані на рис. 3;

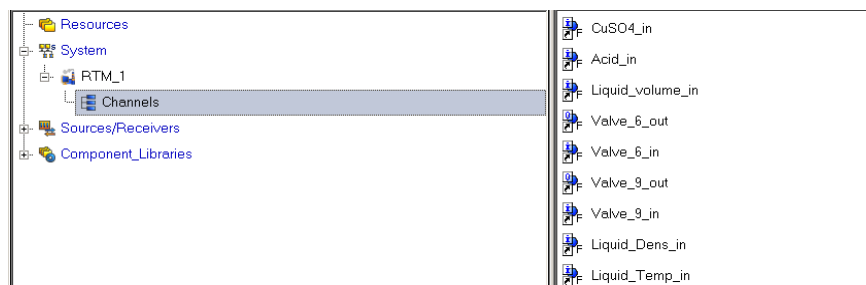


Рис. 3. Вхідні та вихідні інформаційні канали

- «Screen#1:1» - людино-машинний інтерактивний (HMI) інтерфейс системи керування.
 - «PRG_Generator» - генератор імпульсів, необхідний для забезпечення інформаційного обміну з комп'ютерною моделлю процесу, реалізований на мові програмування FBD;
 - «PRG_Dosator» - адаптивні алгоритми керування дозаторами, реалізовані на мові програмування ST.
- Інформаційні канали наведені на рис. 3 мають наступне функціональне призначення:

Вхідні канали

CuSO₄_in - вхідний канал, передає з OPC сервера до системи керування значення вмісту сульфату міді (мідного купоросу) в розчині; **Acid_in** - вхідний канал, передає з OPC сервера до системи керування значення вмісту кислоти H₂SO₄ в розчині; **Liquid_volume_in** - вхідний канал, передає з OPC сервера до системи керування значення кількості рідини в реакторі «1»; **Liquid_Dens_in** - вхідний канал, передає з OPC сервера до системи керування значення щільності реакційного розчину, при досягненні значення 1,42 г/літр необхідно починати відбір розчину на кристалізацію; **Liquid_Temp_in** - вхідний канал, передає з OPC сервера до системи керування значення температури реакційної суміші.

Вихідні канали

Valve_6_out - вихідний канал, передає розраховане системою керування значення (у відсотках відкриття) положення виконавчого пристрою «6» на OPC сервер; **Valve_9_out** - вихідний канал, передає розраховане системою керування значення (у відсотках відкриття) положення виконавчого пристрою «9» на OPC сервер.

Для відстеження положення (у відсотках відкриття) виконавчих пристроїв, тобто для забезпечення зворотнього зв'язку по каналу передачі керуючої дії, в систему каналів було додано допоміжні вхідні канали «**Valve_6_in**» та «**Valve_9_in**» для виконавчих пристроїв «6» та «9» відповідно.

Система внутрішніх змінних, необхідних для забезпечення роботи системи керування та виконання всіх її функцій представлена на рисунку 4. Для простоти реалізації проекту, змінні призначенням яких є інформаційний обмін зі вхідними або вихідними інформаційними каналами, мають туж саму назву, що і пов'язані зі змінними канали.

Name	IO Type	Data Type	Def. Value	Link
CuSO ₄	IN	REAL		☒ CuSO ₄ _in:Real Value (System.RTM_1.Channels)
Reset_ChemCAD	IN	REAL		☒ RestoreInitialState_out:Value (Sources/Receivers.OPC_1.OPC_Сервер_1)
Acid	IN	REAL		☒ Acid_in:Real Value (System.RTM_1.Channels)
Liquid_vol	IN	REAL		☒ Liquid_volume_in:Real Value (System.RTM_1.Channels)
Liquid_dens	IN	REAL		☒ Liquid_Dens_in:Real Value (System.RTM_1.Channels)
Liquid_temp	IN	REAL		☒ Liquid_Temp_in:Real Value (System.RTM_1.Channels)
Valve_6_in	IN	REAL		☒ Valve_6_in:Real Value (System.RTM_1.Channels)
Valve_6_off	IN	REAL		
Valve_6_out	IN	REAL		☒ Valve_6_out:Input Value (System.RTM_1.Channels)
Valve_9_in	IN	REAL		☒ Valve_9_in:Real Value (System.RTM_1.Channels)
Valve_9_off	IN	REAL		
Valve_9_out	IN	REAL		☒ Valve_9_out:Input Value (System.RTM_1.Channels)
Valve_Percent	IN	REAL	25	
Vol_max	IN	REAL	4.3	
Vol_min	IN	REAL	3.3	
Density_doze	IN	REAL	1.42	
Auto_doze_onoff	IN	REAL	1	

Рис. 4. Внутрішні змінні SCADA

На рис. 4 стовпець «**IO Type**» дає можливість визначити напрямок інформаційного обміну (IN або OUT) між змінними. Це необхідно у випадках, коли система керування має розподілену мережеву архітектуру, тобто реалізована не декількох ПК поєднаних в одну систему за допомогою комп'ютерної мережі, але при цьому має єдину систему змінних. Система керування в межах даного проекту працює на одному ПК, тому для змінних не має значення напрямок інформаційного обміну.

Стовпець «**Data Type**» дає можливість обрати тип даних для кожної змінної. REAL - число з плаваючою точкою описується 4 байтами, максимальне значення 3.402823466E+38. Цей тип даних використаний для всіх змінних проекту.

Стовпець «**Def. Value**» надає можливість вказати значення за замовчуванням для обраних змінних. Наявні в програмі CHEMCAD та доступні для використання в комп'ютерних моделях виконавчі пристрої («6» та «9») мають нелінійну витратну характеристику та на перших 30% відкриття регулюючого органу забезпечують 90% витрати від максимального значення. Можливо це пояснюється не ідеальною реалізацією моделі виконавчого пристрою для малих витрат в CHEMCAD, котрий не призначений для вирішення задач керування. Для компенсації нелінійної витратної характеристики виконавчих пристроїв, ступінь їх відкриття обмежена на значенні 25% (змінна «**Valve_Percent**»).

Змінні «**Vol_max**» та «**Vol_min**» обмежують максимальний та мінімальний об'єм рідини в реакторі «1» відповідно 4,3 та 3,3 літри.

Змінна «**Auto_doze_onoff**» зв'язує органи ручного керування реалізовані в НМІ з підсистемою адаптивного дозування, та надає можливість оператору системи керування вмикати або вимикати адаптивне дозування. За замовчуванням адаптивне дозування є увімкненим.

Стовпець «**Link**» задає прив'язки для змінних, тобто вказує споживача в межах програмного забезпечення системи керування, з котрим відповідна змінна здійснює інформаційний обмін. Наприклад

змінна «Reset_ChemCAD» пов'язана зі змінною OPC сервера «RestoreInitialState_Out» котра дозволяє оператору системи обнулити комп'ютерну модель реалізовану в CHEMCAD, тобто повернути модель та всі її внутрішні змінні у початковий стан, котрий був до початку роботи системи. Ця функція є необхідною на етапі розробки та налагодження системи керування.

Для перевірки працездатності запропонованої програмної структури, системи інформаційних каналів та внутрішніх змінних системи керування процесом отримання мідного купоросу, був виконаний тестовий «прогін» програмної складової у програмному середовищі SCADA. Графічні залежності (тренди), котрі демонструють зміну цільових параметрів процесу отримання мідного купоросу (вміст CuSO_4 та H_2SO_4 у реакційному розчині) у часі наведені на рисунку 5. Для перевірки достовірності отриманих перехідних характеристик контролюваного процесу, було виконано їх порівняння з даними лабораторної установки для отримання розчину мідного купоросу, котра працює в «НДЛ Метрологічного забезпечення екологічного контролю зовнішнього середовища» ННІ УДХТУ, УДУНТ.

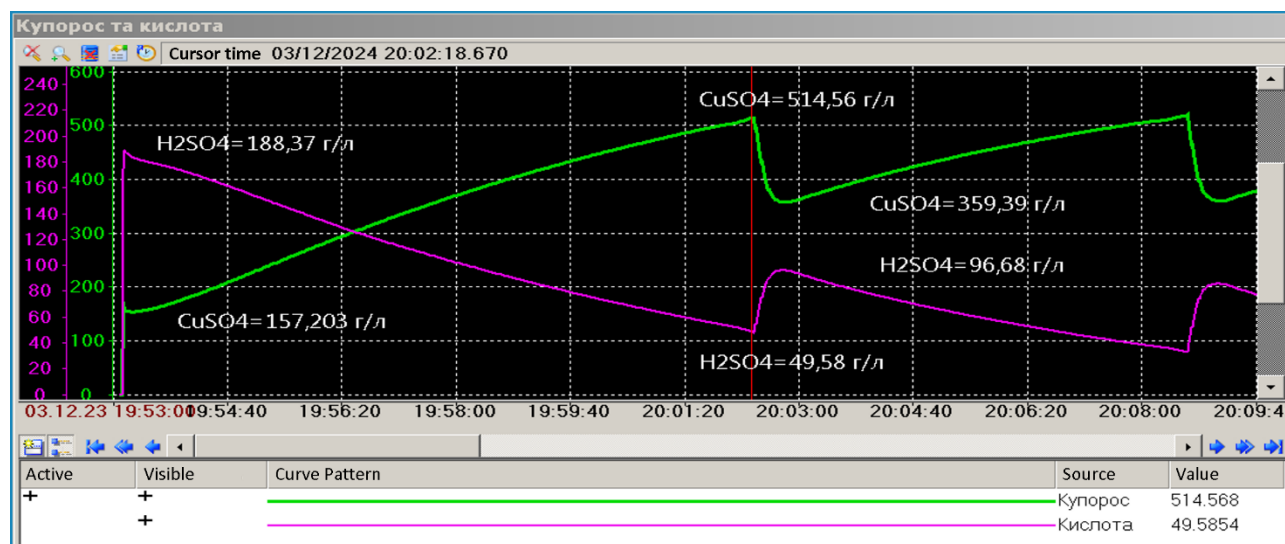


Рис. 5. Перехідні характеристики процесу отримання мідного купоросу

Отримані та наведені на рисунку 5 залежності повністю відтворюють поведінку реального процесу. На початку технологічного процесу вміст кислоти в реакторі перевищує вміст купоросу, котрий доданий в реактор лише для підтримання реакції, відповідно $\text{H}_2\text{SO}_4=188,37$ грам/літр, $\text{CuSO}_4=157,203$ 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 $\text{H}_2\text{SO}_4=49,58$ грам/літр, $\text{CuSO}_4=514,57$ грам/літр. Відновлення об'єму рідини в реакторі шляхом додавання розчину 20% H_2SO_4 призводить до часткового відтворення кислотності розчину ($\text{H}_2\text{SO}_4=96,68$ грам/літр) та до зниження вмісту мідного купоросу ($\text{CuSO}_4=359,39$ грам/літр). Після чого робочий цикл установки для отримання розчину мідного купоросу повторюється.

Висновки

В даній роботі розроблена загальна структура програмного забезпечення системи керування процесом отримання мідного купоросу в програмному середовищі SCADA системи TRACE MODE. Розглянуті основні етапи та особливості створення та налаштування системи інформаційних каналів та внутрішніх змінних системи керування процесом, а саме: наведена характеристика запропонованої програмної структури, визначене функціональне призначення основних вхідних та вихідних інформаційних каналів системи керування, котрі використовуються для забезпечення інформаційного обміну з сервером OPC; наданий перелік, функціональне призначення та характеристика системних змінних SCADA, котрі забезпечують інформаційний обмін в реальному часі між частками системи (інформаційні канали, HMI, алгоритми керуючої підсистеми).

Виконана перевірка працездатності запропонованої структури програмного забезпечення та людино-машинного інтерфейсу системи керування на базі SCADA, отримані перехідні характеристики процесу, достовірність яких перевірена шляхом порівняння з даними реальної лабораторної установки.

Запропоновані в роботі технічні рішення, принципи та особливості розробки структури програмного забезпечення системи керування процесом отримання мідного купоросу 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 моделях.

Література

1. Селевцов Л. І. Автоматизація технологічних процесів. Київ : Вид. центр «Акад.», 2014. 352 с.
2. Левчук И., Белоброва Е., Корсун В. Принципы интеграции специального программного обеспечения информационно управляющих систем в современные SCADA системы. *Системы обработки информации*. 2015. № 5 (130). С. 141–144.
3. 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.
4. Моделирование химико-технологических процессов у SCADA за допомогою технології OPEN PLATFORM COMMUNICATIONS / І. Левчук та ін. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 2. С. 59–66.

References

1. Selevtsov L. I. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv. Kyiv : Vyd. tsentr «Akad.», 2014. 352 s.
2. Levchuk I., Belobrova E., Korsun V. Principy integracii specialnogo programmnogo obespecheniya informacionno upravlyayushih sistem v sovremennye SCADA sistemy. *Sistemy obrobki informaciyi*. 2015. № 5 (130). S. 141–144.
3. Rozrobka kompiuternoї modeli protsesu otrymannia rozchynu midnoho kuporosu, adaptovanoi dlia rozv'iazannia zadach upravlinnia / I. Levchuk ta in. *Visnyk KhNU*. 2021. № 4(299). S. 59–66.
4. Modeliuvannia khimiko-tekhnolohichnykh protsesiv u SCADA za dopomohoiu tekhnolohii OPEN PLATFORM COMMUNICATIONS / I. Levchuk ta in. *Radioelektronni i kompiuterni systemy*. 2020. № 2. S. 59–66.