



УДК 004.942:681.5.015.23

# МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БЕЗ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ЗАСОБАМИ CODESYS

## MODELING OF AN AUTOMATED OPEN-LOOP CONTROL SYSTEM USING CODESYS

Яланецький В. А.  
Yalanetskyi V. A.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна  
NTU of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6163-0258>  
E-mail: [v.yalanetskyi@gmail.com](mailto:v.yalanetskyi@gmail.com)

Copyright © 2026 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v18i1.3425

**Анотація.** У роботі розглянуто питання моделювання систем керування (СК) без зворотного зв'язку (OLCS) із застосуванням середовища CoDeSys та програмованих логічних контролерів (PLC). СК забезпечує керування технологічними параметрами, такими як рівень речовини, швидкість, температура чи положення виконавчих елементів. Проаналізовано OLCS-системи як початковий етап формування знань про структуру, динаміку та стабільність СК, порівнюючи їх із замкнутими системами зі зворотним зв'язком (CLCS). Методологія моделювання базується на графічних SFC-схемах та ST-кодах стандарту IEC 61131-3, що дозволяють описати послідовність операцій та фізичні процеси в віртуальному об'єкті керування (ОК). Для демонстрації запропоновано приклад технологічного ОК – процес виготовлення суміші із використанням клапанів, насосу, мішалки та ємностей. Алгоритм керування включає послідовне завантаження компонентів, перемішування та перекачування суміші за часовими таймерами без сенсорів. Модель фізичних процесів в ОК враховує закон Торрічеллі та рівняння Бернуллі для опису витікання рідини через клапани та отвори. Розроблено функціональний блок моделі ОК, що відокремлює алгоритм керування від фізичної моделі ОК. Синхронізація таймерів та тривалість циклу PLC визначають точність виконання технологічних операцій. Результати моделювання демонструють можливість аналізу часових характеристик процесу, перевірки логіки керування, оцінки впливу відмов обладнання та оптимізації енергоспоживання без необхідності у фізичних промислових системах. Модель дозволяє інтеграцію з HMI та SCADA, віртуальне навчання операторів та розробку безпечних стратегій керування. Запропонований підхід сприяє розвитку автоматизованих промислових процесів, підвищенню надійності та ефективності виробництва, відповідає тенденціям цифровізації та індустрії 4.0 і є актуальним для дистанційного навчання та підготовки фахівців у сфері промислової автоматизації.

**Abstract.** The paper addresses the modeling of open-loop control systems (OLCS) using the CoDeSys environment and programmable logic controllers (PLC). Control systems manage technological parameters such as substance level, flow rate, temperature, or the position of actuators. OLCS are analyzed as an initial stage for understanding the structure, dynamics, and stability of control systems, compared to closed-loop control systems (CLCS). The modeling methodology is based on graphical SFC diagrams and ST code according to the IEC 61131-3 standard, allowing the description of operation sequences and physical processes within a virtual Plant. For demonstration, a technological Plant is presented – the process of preparing a mixture using valves, a pump, a mixer, and storage tanks. The control algorithm includes sequential component loading, mixing, and transferring the mixture using timed intervals without sensors. The physical process model in the Plant incorporates Torricelli's law and Bernoulli's equation to describe fluid outflow through valves and openings. A functional block for the Plant model is developed to separate the control algorithm from the physical model of the Plant. Timer synchronization and PLC cycle duration determine the accuracy of technological operations. The simulation results demonstrate the possibility of analyzing process timing characteristics, verifying control logic,



*assessing the impact of equipment failures, and optimizing energy consumption without the need for physical industrial systems. The model supports integration with HMI and SCADA, virtual operator training, and the development of safe control strategies. The proposed approach contributes to the advancement of automated industrial processes, enhancing production reliability and efficiency, aligns with digitalization trends and Industry 4.0, and is relevant for remote learning and the training of specialists in industrial automation.*

**Ключові слова:** автоматизація, автоматичне керування, моделювання, зворотній зв'язок, CoDeSys.

**Key words:** automation, automatic control, automated control, modeling, open-loop, feedback, CoDeSys.

### Вступ

Система керування (СК), як автоматизованого так і автоматичного — це сукупність програмно-технічних засобів, призначених для керування поведінкою об'єкта з метою досягнення бажаних параметрів (наприклад, рівня речовини, швидкості, температури, положення тощо). Усі СК можна поділити на два основні типи [1]: розімкнені СК [2] без зворотного зв'язку (Open-Loop Control Systems, OLCS) та замкнуті СК зі зворотними зв'язками (Closed-Loop Control Systems, CLCS, або Feedback Control).

Моделювання СК може здійснюватися аналітично (математичними рівняннями, програмними моделями) та графічно. Графічний спосіб дозволяє наочно відобразити структуру СК, взаємозв'язки між її елементами, потоки сигналів і функції компонентів. У промисловій автоматизації основними видами графічного подання є: структурні схеми автоматизації та функціональні схеми автоматизації. Основним видом алгоритмічного рішення моделі СК є програмно-технічне із застосування технічних засобів автоматизації, інтернету речей та відповідного супровідного інформаційного та програмного забезпечення.

OLCS-системи описуються лінійними або нелінійними рівняннями, які легше розв'язати та реалізувати програмно. Це дозволяє відпрацювати методи моделювання та аналізу (диференціальні рівняння, операторні методи, структурні схеми, моделювання в MATLAB/Simulink, CoDeSys тощо). У OLCS-системах будь-яке відхилення параметра (навантаження, вхідного сигналу) напряму впливає на вихід. Це дає можливість вивчати чутливість СК та вплив невизначеностей. У промисловості часто існують відкриті контури (наприклад, СК із числовим програмним керуванням, подача дозованої кількості матеріалу, просте вмикання/вимикання механізмів). Їхнє моделювання дозволяє оцінити точність, надійність і межі застосування таких підходів.

Моделювання в CoDeSys дозволяє створювати логічні моделі керування без фізичного обладнання. Використовувати симуляцію програмованого логічного контролера (ПЛК, *Programmable Logic Controller*, PLC) щоби тестувати керуючі алгоритми й моделювати OLCS та CLCS системи. В реальних автоматизованих технологічних процесах PLC спілкується із іншими PLC через комунікаційні протоколи. Дані та інформація можуть нести цінний, секретний характер, вони підлягають криптографічному шифруванню та збереженню на захищених відповідним чином базах даних, наприклад, в блокчейні, що забезпечить неможливість підробки показників з периферійних пристроїв. Така концепція зберігання даних від PLC у блокчейні підходить для фармацевтики, харчової промисловості та енергетики, де важлива прозорість й захищеність даних.

### Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

В сучасній теорії керування найбільшого поширення набули CLCS. Дослідження та моделювання OLCS має свою важливу наукову та практичну цінність оскільки вивчення OLCS є початковим кроком у розумінні роботи автоматизованих СК. Це дозволяє формувати уявлення про структуру, передавальні функції, динаміку та стабільність без ускладнень, пов'язаних зі зворотним зв'язком. Ключовим компонентом СК є PLC, якій виконує задачі керування згідно закладених алгоритмів та програм. У роботі [3] представлені результати імітаційного моделювання компонентів СК на основі PLC і SCADA а також приклади створення застосункових програм на мовах стандарту IEC 61131-3. Одними з ключових мов цього стандарту є мови ST та SFC [5].

Вивчення моделей OLCS-систем дозволяє обґрунтовано пояснити необхідність введення зворотного зв'язку й показати, як він покращує стійкість і точність системи. Дослідження таких моделей дає можливість розробляти методи прогнозування похибок, оптимізації режимів роботи та побудови гібридних СК. В світлі розвитку технологій штучного інтелекту [4], зокрема в секторі автоматизації бізнес- та технологічних процесів, результати моделювання OLCS можуть слугувати вхідними навчальними даними для алгоритмів штучного інтелекту.

Сучасний тренд в промисловості – це цифровізація виробничих, технологічних та бізнес процесів із використанням інформаційно-комунікаційних технологій, що є частиною четвертої промислової революції, Індустрії 4.0. Особливим попитом користуються додатки, що поєднують світ інформаційних технологій (IT) та операційних технологій (OT). В роботі [6] наведені дослідження різних систем програмування OLCS та їх зв'язку з розробленими хмарними додатками. Ці додатки призначені для моніторингу даних та екстреного втручання дискретно-подійної системи. Головними засобами програмування та моделювання СК є Simulink та CoDeSys. У підручнику [7] викладено основні прийоми імітаційного фізичного моделювання електротехнічних та електромеханічних систем в середовищі MATLAB/Simulink SimPowerSystems. У статті [8] наголошено на тому, що CoDeSys не залежить від виробника PLC, що надає можливість написання, моделювання та візуалізації програм без необхідності володіння фізичним пристроєм. У постковідний та повоєнний час надзвичайно актуально застосовувати легкий у використанні інструментарій CoDeSys для дистанційної та онлайн-форм навчання програмуванню PLC й моделюванню СК.



У [9] розглянуто приклад використання комплексу CoDeSys для розробки програми моделювання технологічного процесу дозування та змішування склошхти. Однією з зазначених переваг CoDeSys є можливість його безкоштовного використання, пакет програм для встановлення знаходиться у вільному доступі.

#### Мета і завдання дослідження.

На ринку праці спостерігається сталий дефіцит фахівців з підключення ПЛК до інформаційно-комунікаційних технологій (хмарних, веб- та мобільних додатків тощо). Основною метою роботи є підготовка прикладів, придатних для навчальних цілей, які б стосувалися моделювання СК віртуальним об'єктом керування (ОК) за допомогою програми PLC засобами CoDeSys. В рамках даної роботи продемонстровано первинний приклад моделювання як ОК та і OLCS-системи вцілому.

#### Методи і матеріали досліджень.

У якості прикладу технологічного ОК, задля побудови програмної моделі OLCS-системи, розглянемо процес виготовлення заданої суміші згідно рецептури із використанням набору технічних засобів згідно структурної схеми автоматизації на рис. 1. Технічні засоби: клапани з моторами, насос, мішалка та дві циліндричні ємності. Рецептурний профіль із виробництва продуктової суміші складатиметься із часових уставок, без зазначення бажаних та робочих значень параметрів СК, оскільки в OLCS відсутні сенсорні пристрої.

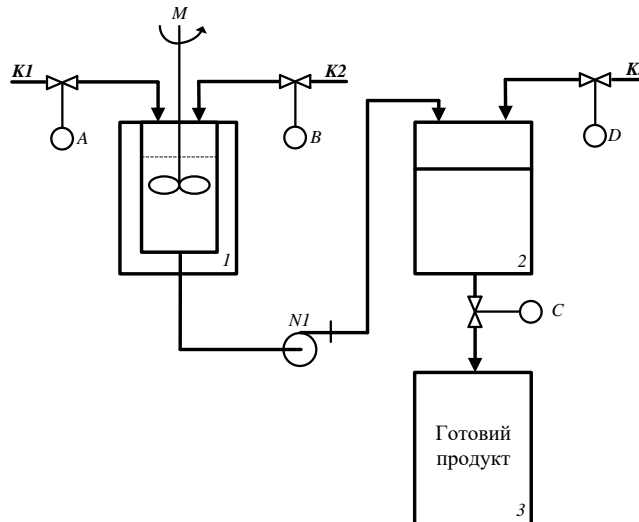
СК має виконувати наступний алгоритм роботи із виробництва продуктової суміші:

Крок 1. При натисненні кнопки «СТАРТ» розпочати процес, при цьому відкрити клапан **A** і завантажувати компонент **K1** протягом 10 с в ємність **1**.

Крок 2. По закінченні завантаження компонента **K1**, за працюючої мішалки **M** розпочати завантаження компонента **K2**, відкривши клапан **B**.

Крок 3. Завантаження здійснювати протягом 15 с.

Крок 4. По закінченні завантаження компонента **K2** суміш продовжувати перемішувати **ще протягом 10 с**.



**Рис. 1 — Приклад структурної схеми автоматизації**  
**Fig.1 — Example of a structural diagram of an automation system**

Крок 5. Потім суміш перекачати в ємність 2, включивши насос **N1**. Спорожнення ємності 1 триває 25 с.

Крок 6. В ємність 2 завантажувати компонент **K3** протягом 10 с, відкривши клапан **D**.

Крок 7. Суміш повинна витримуватись протягом 15 с, після чого відкрити клапан **C** та вивантажити готовий продукт з ємності 2 в ємність 3. Спорожнення ємності 2 триває 35 с.

Крок 8. Підготувати СК для приготування нової партії продуктової суміші.

Алгоритм роботи СК реалізується засобами CoDeSys на мові SFC (Sequence Function Chart). SFC – це графічна мова, яка використовується для опису послідовних операцій. Процес представляється у вигляді набору певних кроків, зв'язаних переходами. До кожного переходу прикріплена логічна умова. Дії всередині кроків потрібно записати більш детально за допомогою мови ST за стандартом IEC 61131-3.

#### Результати досліджень.

Розробка моделі та тестування результатів роботи моделі СК виконувались у CoDeSys версії 3.5 SP11 Patch 5 Hotfix 4. Перед початком моделювання необхідно звести у таблицю формалізовані змінні ОК, що фігурують у СК та змінні периферійних технічних засобів автоматизації (у табл. 1 наведено перелік основних змінних).

Програмний імітатор ОК потрібно імплементувати у PLC-програму на мові програмування ST та розмістити у окремому функціональному блоці (ФБ), що дозволить у подальшому вільно видалити цей імітатор з коду, залишивши в програмі CoDeSys лише алгоритм керування СК. Для цього в проєкті CoDeSys створено окремий ФБ *Model\_OA*, код якого оголошує змінні та реалізує модель фізичних процесів в ОК (рис. 2).



З ємності 1 рідина витікає самотоком через фіксований отвір, а з ємності 2 — через клапан зі змінною площею отвору. Для незмінної, нев'язкої (ідеалізованої) рідкої суміші, що витікає через отвір на нижній стінці ємності на глибині  $h$  (від поверхні дзеркала рідини до центру отвору), швидкість витікання рідини обчислюється згідно закону Торрічеллі [10], який впливає з рівняння Бернуллі, припустивши, що тиск на поверхні ємності і на виході отвору однаковий (атмосферний, тож втратами енергії можна знехтувати). Рівняння Торрічеллі враховує площу отвору (на рис. 2 див. 9-й та 14-й рядки коду в моделі ОК). Клапан зменшує ефективну площу прохідного перетину та створює додаткові гідравлічні (локальні) втрати, які у рівнянні Бернуллі представляються у вигляді еквівалентного коефіцієнта втрат. Між ємністю 2 та ємністю два за допомогою насоса перекачується технологічна суміш. Швидкість цієї рідини вважатимемо ідеально сталою (залежить від пропускної здатності насоса), тож для цієї частини моделі ОК закони Бернуллі-Торрічеллі не застосовуються.

Таблиця 1 — Основні змінні моделі віртуального ОК

Змінна	Пояснення
q1	поточний об'єм компоненту у ємності 1 [л]
q2	поточний об'єм компоненту у ємності 2 [л]
h1	поточний рівень компоненту у ємності 1 [дм]
h2	поточний рівень компоненту у ємності 2 [дм]
valve_in1	сигнал закр./відкрит. впускного клапану А [1/0]
valve_out1	сигнал закр./відкрит. випускного клапану С [1/0]
mixer	сигнал вмикання/вимикання мішалки М [1/0]
pump	сигнал вмикання/вимикання насоса N1 [1/0]
r_hole1	радіус сточного отвору ємності 1 [дм]
q_in1	макс. швидкість потоку через клапан А [л/сек.]
q_out1	поточна швидкість стоку через отвір ємності 1 [л/сек.]
q_out2	поточна швидкість стоку через клапан С [л/сек.]
q_in4	поточна швидкість потоку через насос N1 [л/сек.]

```

1  in1:= q_in1 * BOOL_TO_INT(valve_in1);
2  in2:= q_in2 * BOOL_TO_INT(valve_in2);
3  in3:= q_in3 * BOOL_TO_INT(valve_in3);
4  h1 := q1/(pi * r_tank1 * r_tank1);
5  h2 := q2/(pi * r_tank2 * r_tank2);
6
7  IF q1 <= 0 THEN q_out1 := 0;
8  ELSE
9    q_out1 := SQRT(2 * g * h1) * pi * r_hole1 * r_hole1 * BOOL_TO_INT(pump);
10   q_in4 := q_out1;
11  END_IF
12  IF q2 <= 0 THEN q_out2 := 0;
13  ELSE
14   q_out2 := SQRT(2 * g * h2) * pi * r_hole2 * r_hole2 * BOOL_TO_INT(valve_out1);
15  END_IF
16  q1 := q1 + (in1 + in2 - q_out1);
17  q2 := q2 + (in3 + q_in4 - q_out2);
18  IF q1 <= 0 THEN q1 := 0; h1 := 0;
19  END_IF
20  IF q2 <= 0 THEN q2 := 0; h2 := 0;
21  END_IF

```

Рис. 2 — Реалізація моделі ОК мовою ST  
 Fig.2 — Implementation of plant in ST language

Головна програма моделі СК в розділі реалізації проекту CoDeSys містить SFC-схему у складі моделі ОК (рис. 3) та ST-кодів стану керуючих сигналів. Початковий стан SFC-програми описується початковими кроками, які позначається графічно блоком з подвійною рамкою. Після запуску SFC-програми маркер автоматично встановлюється на кожний початковий крок. Переходи між кроками представлені горизонтальними смужками, які перетинають лінії зв'язку. В SFC-програмі є можливість створити розгалуження або об'єднання потоків керування: розходження коли один крок веде до кількох гілок () та сходження – кілька гілок сходяться в одну.

Розходження буває двох типів: альтернативне, яке активує лише одну гілку залежно від умови переходу та паралельне – активуються всі гілки одночасно, тобто процес виконується паралельно. Сходження також буває: альтернативним коли з різних гілок СК повертається в одну послідовність та паралельним – з'єднує паралельні гілки, і наступний крок активується лише після завершення всіх паралельних процесів. Окрім наведених



розгалужень існує можливість створення подвійного розходження, коли від одного кроку одночасно відбуваються два різні типи розгалуження: наприклад, одна гілка йде альтернативно, а інша паралельно.

Перший блок SFC-схеми ініціалізує початковий стан ОК та СК. Далі через механізм подвійного розходження створюємо ліворуч логіку роботи СК, а праворуч – логіку життєдіяльності ОК згідно його фізичних законів, реалізованих мовою ST (див. рис. 2).

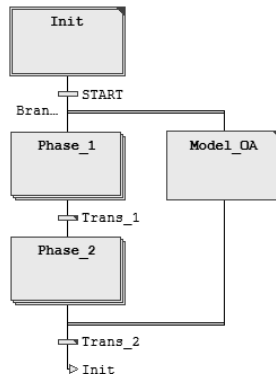


Рис. 3 — Головна програма моделі СК в проєкті CoDeSys  
Fig.3 — Main program of plant in the CoDeSys project

SFC-схема моделі СК також містить блоки **Phase\_1** та **Phase\_2**. Це макро-елементи фаз, які містять реалізацію певної стадії алгоритму керування СК. Приклад кодової реалізації першої фази Phase\_1 наведений у табл. 2.

Таблиця 2 — Фрагмент програми керування на прикладі Phase\_1 моделі СК

Елемент	Код мовою ST
Step1	v_in1:=TRUE;
Step2	v_in1:=FALSE; v_in2:=TRUE; m:=TRUE;
Step3	v_in2:=FALSE;
Trans_1	Step1.t>=T#10S;
Trans_2	Step2.t>=T#10S;

Умовою переходу між кроками є досягнення таймерами часових заданих значень згідно алгоритму роботи СК. PLC в такій моделі керування не володіє інформацією щодо реального стану, як виконавчих елементів, так і наявності технологічної речовини, що перекачується трубопроводом.

У СК, реалізованих за допомогою SFC-схем, важливим аспектом є синхронізація таймерів переходу між кроками. Кожен крок алгоритму може мати прив'язану тривалість, визначену таймером, що забезпечує послідовне виконання операцій, наприклад дозування компонентів, перемішування або перекачування суміші між ємностями. Для точного виконання технологічного процесу необхідно, щоби таймери були узгоджені із циклом опитування PLC, тобто тривалістю одного робочого циклу PLC.

Тривалість циклу PLC визначає, як часто виконуються всі операції PLC, включаючи оновлення станів кроків SFC, обробку умов переходів та керування виходами (клапанами, насосами, мішалкою). Якщо тривалість циклу PLC занадто велика порівняно з налаштованими таймерами, виникає ризик затримок у переходах між кроками, що може призвести до неточного дозування або порушення технологічної послідовності.

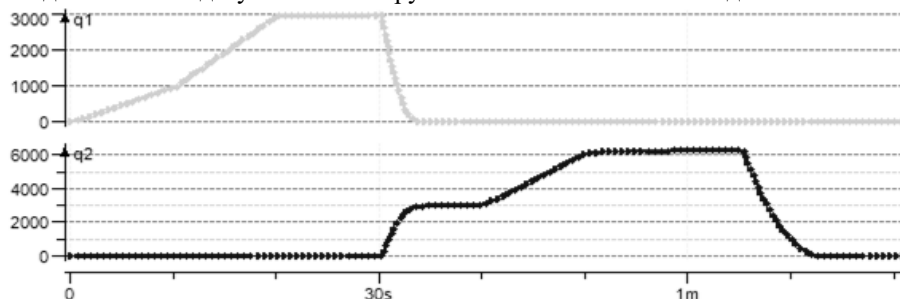


Рис. 4 — Часова діаграма параметрів q1 та q2 моделі СК в CoDeSys-Trace  
Fig. 4 — Time diagram parameters q1, q2 on control system model in CoDeSys-Trace

В контексті PLC та CoDeSys, кожний проєкт містить певний параметр, що визначає інтервал виконання головної задачі PLC, тобто тривалість одного циклу. Враховуючи кодову реалізацію моделі ОК, де швидкість подачі суміші задана у літрах за секунду, тривалість одного циклу PLC має бути також 1 секунда.



Виконавши запуск моделі СК засобами CoDeSys-Trace можна спостерігати за зміною як внутрішніх параметрів СК (рис. 4) так і керуючих сигналів до клапанів, насосу та мішалки (рис. 5).

Спочатку виконується послідовне дозування компонентів у першу ємність через клапани А (valve\_in1) і В (valve\_in2) з заданою тривалістю. Має місце СК без зворотного зв'язку на основі таймера.

Далі, вмикання мішалки М (mixer) забезпечує однорідність суміші без контролю густини, також по заданому часу. Далі суміш перекачується в ємність 2 насосом (pump), витримується із додавання рецептурної речовини (через клапан D), після чого відбувається вивантаження готового продукту через клапан С. На графіках в Trace також можна спостерігати за зміною внутрішніх параметрів моделі ОК: кількість суміші у першій (q1) та другій (q2) ємностях.

#### Обговорення результатів.

Моделювання СК без зворотного зв'язку із застосуванням CoDeSys дозволяє досліджувати та вирішувати низку наукових і інженерних задач без необхідності у реальних промислових засобах автоматизації. Налаштування і введення в експлуатацію таких СК керування відбувається під наглядом інженерів-технологів шляхом пошуку та підбору часових уставок вмикання/вимикання керуючих пристроїв. Отримана модель СК надає можливість аналізувати та оптимізувати часові характеристики технологічного процесу без урахування енергетичних та матеріальних втрат. Увага може бути зосереджена на дослідженні алгоритму наповнення ємностей через клапани, що мають механізм керування площею отвору. В цьому випадку оператор може самостійно перемикає режими роботи клапанів на потрібну площу. Отримана модель СК відкрита для подальшого вдосконалення аби швидко реалізувати та інтегрувати зовнішні збурюючі фактори, зокрема: вплив інерційності мішалки на однорідність суміші, залежність швидкості спорожнення ємності від характеристик насоса та нелінійність клапанів відносно їх відкриття/закриття.

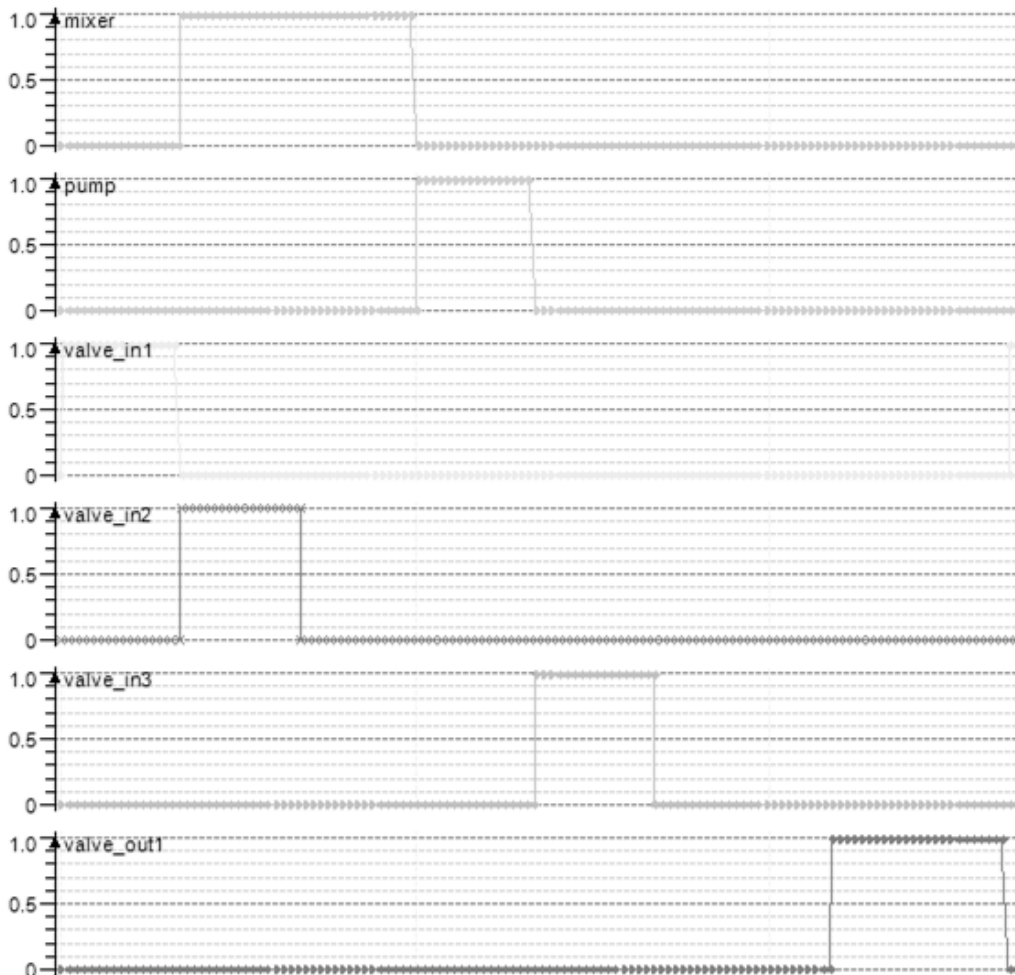


Рис. 5 — Часова діаграма керуючих сигналів моделі СК в CoDeSys-Trace

Fig. 5 — Timing diagram of control signals of the control system model in CoDeSys-Trace

Моделювання OLCS-систем дозволяє досліджувати стратегії комплексного керування, порівнюючи точність і надійність роботи СК, яка функціонує лише на основі часових таймерів, з CLCS, що використовують зворотній зв'язок: датчики рівня, потоку та тиску.



### Висновки.

Розроблена OLCS-модель надає основу для оцінки робастності та надійності СК, дозволяючи моделювати відмови обладнання, включно з несправністю клапанів, насосів або мішалки, а також аварійні ситуації, наприклад переповнення ємності чи кавітацію насоса, що сприяє розробці безпечних стратегій зупинки та відмовостійкого керування. Удосконалена OLCS-модель також дозволить оцінювати енергетичну та ресурсну ефективність, аналізуючи споживання енергії мішалкою та насосом у різних режимах роботи та визначаючи оптимальний баланс між тривалістю перемішування та якістю продукту, зменшуючи при цьому втрати сировини через точніше керування клапанами. Інтеграція OLCS-моделі з HMI та зі SCADA-системами забезпечить можливість віртуального експериментування без використання фізичного обладнання, дозволить збирати первинні технологічні дані, візуалізувати процес та безпечно й бюджетно навчати операторів. Загалом, такий підхід до віртуального моделювання створює наукову основу для оптимізації автоматизованих промислових процесів, підвищуючи їх ефективність та якість вихідного продукту.

Подальше дослідження передбачає моделювання автоматизованої системи керування зі зворотними зв'язками засобами CoDeSys. Отримані наразі результати моделювання плануються надалі використати в процесі інтеграції технологічного рівня керування із верхніми організаційними рівнями бізнес-процесів, зокрема збереження технологічних й енергетичних параметрів організувати на інфраструктурі блокчейну для подолання ризиків безпечного зберігання критичних та цінних даних про перебіг низового технологічного процесу.

### Список використаних джерел

1. Touchette H., Lloyd S. Information-theoretic approach to the study of control systems // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2004. – Vol. 331, Iss. 1–2. – P. 140–172. – ISSN 0378-4371. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2003.09.007>.
2. Basu S. PLC and Open Loop Control System (OLCS) Functional and Design Details // *Plant Intelligent Automation and Digital Transformation*. – Academic Press, 2023. – Vol. 1. – P. 99–170. – ISBN 978-0-323-90246-5. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90246-5.00010-7>.
3. Николаичук М., Рісков Ю. Імітаційне моделювання компонентів систем керування на базі PLC і SCADA // *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Івано-Франківськ, 6–8 липня 2023 р.)*. – Івано-Франківськ: Голіней О. М., 2023. – С. 241–243. – ISBN 978-617-8128-23-4. URL: <https://journal.comp-sc.if.ua/test/index.php/ITCM/article/view/160>.
4. González-Marcos A., Ordieres-Meré J., Muñoz-Munilla V. et al. An intelligent supervision system for open loop controlled processes // *J Intell Manuf.* – 2013. – Vol. 24. – P. 15–24. URL: <https://doi.org/10.1007/s10845-011-0532-6>.
5. Wang K., Wang J., Poskitt C. M., Chen X., Sun J., Cheng P. K-ST: A Formal Executable Semantics of the Structured Text Language for PLCs // *IEEE Transactions on Software Engineering*. – 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.04076>.
6. Kučera E., Haffner O., Drahoš P., Cigánek J. Educational Case Studies for Pilot Engineer 4.0 Programme: Monitoring and Control of Discrete-Event Systems Using OPC UA and Cloud Applications // *Appl. Sci.* – 2022. – Vol. 12. – 8802. URL: <https://doi.org/10.3390/app12178802>.
7. Толочко О. І. Моделювання систем автоматичного керування: підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / *КПІ ім. Ігоря Сікорського*. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 328 с. – URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/57865/1/MACS\\_LR\\_2023.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/57865/1/MACS_LR_2023.pdf).
8. Bartman J., Sobczyński D. CODESYS – uniwersalne narzędzie do programowania sterowników PLC // *Dydaktyka Informatyki*. – 2021. – Vol. 16. – P. 175–183. – Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego. URL: <https://repozytorium.ur.edu.pl/items/06a8f9b3-3a1e-4cba-b402-e661d0bce2c6>.
9. Яланецький В. А. Моделювання процесів і систем: комп'ютерний практикум: навч. посіб. для студентів освітньої програми «Інтегровані інформаційні системи» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» // *КПІ ім. Ігоря Сікорського*. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 134 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48454>.

Отримана в редакції 05.02.2026. Прийнята до друку 16.02.2026. Розміщено в інтернеті 30 березня 2026.  
Received 05 February 2026. Approved 16 February 2026. Available in Internet 30 March 2026