

**Курдюмов Дмитро Сергійович**, аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем, +38(067)747-72-47, Dmytro.Kurdiumov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-7216-4373

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

**Кунченко Тетяна Юрївна**, к.т.н., доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем, +38(050)734-72-02, medvedeva014@gmail.com

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

## ВИМОГИ ДО ТЕСТОВОГО СТЕНДУ ДОЗУВАННЯ РІДИН ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНИХ ПРОЦЕСІВ НАЛИВУ

**Анотація.** У роботі розглянуто питання формування вимог до тестового стенду дозування рідин, призначеного для дослідження дискретних процесів наливу в автоматизованих системах дозування. Проведено аналіз особливостей процесів дозування рідин та визначено необхідність використання спеціалізованих експериментальних установок для дослідження характеристик процесу наливу, перевірки алгоритмів керування та оцінювання точності дозування. Сформульовано основні вимоги до апаратної та програмної частин тестового стенду, які забезпечують можливість проведення експериментальних досліджень у різних режимах роботи системи дозування. Запропоновано архітектуру розробленого тестового стенду, що включає підсистеми подачі рідини, керування потоком, зважування та автоматизованого керування. Описано алгоритм керування процесом наливу, який забезпечує реалізацію одноетапного та двоетапного режимів дозування, а також режиму точного дозування з використанням імпульсного керування клапаном. Розглянуто структуру програмного забезпечення стенду, що базується на використанні програмованого логічного контролера, операторського інтерфейсу та системи керування рецептами. Показано, що розроблений тестовий стенд може використовуватися для дослідження характеристик процесу дозування рідин, аналізу ефективності алгоритмів керування та вдосконалення автоматизованих систем наливу.

**Ключові слова.** дозування рідин; тестовий стенд; процес наливу; алгоритм керування; дискретні процеси; програмований логічний контролер; автоматизовані системи керування.

**Kurdiumov Dmytro**, PhD Student, Automated Electromechanical Systems Department, +38(067)747-72-47, Dmytro.Kurdiumov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-7216-4373

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".  
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

**Kunchenko Tetiana**, PhD, Associate Professor, Automated Electromechanical Systems Department, +38(050)734-72-02, medvedeva014@gmail.com

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»  
2 Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

## REQUIREMENTS FOR A LIQUID DOSING TEST STAND FOR THE STUDY OF DISCRETE FILLING PROCESSES

**Abstract.** *The paper considers the problem of defining requirements for a liquid dosing test stand intended for the study of discrete filling processes in automated dispensing systems. The features of liquid dosing processes are analyzed, and the necessity of using specialized experimental installations for investigating filling process characteristics, testing control algorithms, and evaluating dosing accuracy is substantiated. The main requirements for the hardware and software components of the test stand are formulated, providing the possibility of conducting experimental studies under different operating modes of the dosing system. The architecture of the developed test stand is proposed, including liquid supply, flow control, weighing, and automated control subsystems. A control algorithm for the filling process is described, which enables the implementation of single-stage and two-stage dosing modes, as well as a fine dosing mode based on pulse control of the valve. The structure of the stand software is considered, which is based on the use of a programmable logic controller, a human-machine interface, and a recipe management system. It is shown that the developed test stand can be used for studying the characteristics of liquid dosing processes, analyzing the efficiency of control algorithms, and improving automated filling systems.*

**Keywords.** *liquid dosing; test stand; filling process; control algorithm; discrete processes; programmable logic controller; automated control systems.*

**Вступ.** Процеси дозування рідин широко застосовуються в різних галузях промисловості, зокрема у харчовій, хімічній, фармацевтичній та біотехнологічній [1, 5]. Забезпечення високої точності та повторюваності операцій наливу є важливою умовою стабільності технологічних процесів, зменшення втрат продукту та підвищення якості кінцевої продукції [11]. У сучасних автоматизованих виробничих системах операції дозування виконуються за допомогою програмно-керованих систем, що використовують різноманітні датчики, виконавчі механізми [3, 12] та алгоритми керування.

Особливістю процесів дозування є їх дискретний характер, оскільки технологічний цикл складається з послідовності окремих операцій [7, 10]: підготовки системи, відкриття виконавчих органів, наливу заданого об'єму рідини, закриття клапанів та фіксації результатів операції. Така структура процесу обумовлює необхідність дослідження систем дозування як дискретних динамічних систем, що функціонують у середовищі подій та станів.

Для дослідження характеристик процесів наливу, перевірки алгоритмів керування та експериментальної оцінки точності дозування доцільно використовувати спеціалізовані експериментальні установки – тестові стенди [3, 7]. Такі стенди дозволяють відтворювати роботу систем дозування у контрольованих умовах, змінювати параметри процесу та здійснювати реєстрацію експериментальних даних. Наявність подібних установок є важливою передумовою для розроблення нових алгоритмів керування, моделювання процесів дозування та вдосконалення автоматизованих систем наливу.

Разом з тим аналіз наукових публікацій показує, що значна частина сучасних досліджень зосереджена на розробленні окремих алгоритмів керування або математичних моделей процесів дозування, тоді як питання формування системних вимог до експериментальних тестових стендів висвітлено недостатньо. Зокрема, потребують узагальнення вимоги до апаратної структури стенду, засобів вимірювання, програмного забезпечення керування та інтерфейсу оператора, що забезпечують можливість проведення експериментальних досліджень.

У зв'язку з цим актуальною є задача формування вимог до тестового стенду дозування рідин, який може використовуватися для дослідження дискретних процесів наливу, відпрацювання алгоритмів керування та проведення експериментальних досліджень.

Метою даної роботи є визначення вимог до апаратної та програмної частин тестового стенду дозування рідин, розроблення структури експериментальної установки, опис програмного забезпечення керування та представлення результатів перших експериментальних досліджень процесу наливу.

У роботі сформульовано основні вимоги до побудови тестового стенду дозування рідин, наведено структурну схему розробленої установки, описано алгоритм керування процесом наливу та програмне забезпечення стенду, а також представлено результати первинних експериментальних досліджень.

**Аналіз задач дослідження процесів дозування рідин.** У сучасних автоматизованих виробничих системах застосовуються різноманітні установки дозування рідин, що реалізують операції наливу за допомогою клапанів, насосів, витратомірів або вагових систем [1, 3]. Такі установки використовуються як у промислових лініях розливу, так і в лабораторних дослідницьких комплексах, де виконуються дослідження точності дозування, динаміки процесу наливу та ефективності алгоритмів керування.

Існуючі системи дозування здебільшого орієнтовані на виконання конкретних технологічних операцій і оптимізовані для роботи у складі виробничих ліній [1, 5]. При цьому їх конструкція, апаратна архітектура та програмне забезпечення визначаються вимогами конкретного виробництва і не завжди придатні для проведення експериментальних досліджень. Крім того, у більшості випадків програмне забезпечення таких систем є закритим, що обмежує можливості модифікації алгоритмів керування та збору експериментальних даних.

У наукових дослідженнях для вивчення процесів дозування часто застосовуються лабораторні установки або спрощені експериментальні стенди [7, 9]. Однак у багатьох публікаціях основна увага приділяється розробленню математичних моделей процесів наливу або алгоритмів керування, тоді як питання системного формування вимог до апаратної та програмної структури тестових стендів висвітлено недостатньо. Відсутність узагальнених вимог до таких установок ускладнює створення універсальних експериментальних стендів, придатних для проведення різних типів досліджень.

Таким чином, виникає необхідність визначення комплексу вимог до тестового стенду дозування рідин, який забезпечував би можливість дослідження дискретних процесів наливу, реалізації різних алгоритмів керування, реєстрації експериментальних даних та гнучкого налаштування параметрів експерименту [2, 8].

З урахуванням викладеного, задачею даної роботи є формування вимог до апаратної та програмної частин тестового стенду дозування рідин, розроблення

структури експериментальної установки та перевірка її працездатності шляхом проведення початкових експериментальних досліджень процесу наливу.

**Формування вимог до тестового стенду дозування рідин.** Під час розроблення тестового стенду дозування рідин необхідно враховувати специфіку дослідження дискретних процесів наливу, а також потребу у проведенні експериментів із різними параметрами технологічного процесу. Тестовий стенд має забезпечувати можливість керування процесом дозування, реєстрації параметрів роботи системи та зміну умов проведення експериментів [4, 11].

З огляду на це вимоги до тестового стенду доцільно розділити на вимоги до апаратної частини та програмного забезпечення.

#### 1. Вимоги до апаратної частини стенду

Апаратна частина тестового стенду повинна забезпечувати відтворення процесу дозування рідин у контрольованих умовах та можливість вимірювання основних параметрів процесу. До основних вимог можна віднести такі:

- наявність резервуара для зберігання рідини, що використовується у процесі експериментів;
- наявність системи транспортування рідини до зони наливу (трубопроводи, з'єднувальні елементи);
- використання виконавчих механізмів для керування процесом наливу (електромагнітні клапани та інші запірні пристрої для регулювання потоку);
- наявність вимірювальних засобів для визначення кількості наливої рідини (вагові датчики та інші сенсори);
- використання промислового контролера для реалізації алгоритмів керування;
- забезпечення можливості підключення датчиків та виконавчих механізмів до промислового контролера;
- модульність конструкції стенду, що дозволяє змінювати конфігурацію обладнання або додавати нові елементи;

- забезпечення можливості безпечної експлуатації стенду під час проведення експериментів.

## 2. Вимоги до програмного забезпечення

Програмне забезпечення тестового стенду повинно забезпечувати керування процесом наливу, взаємодію з оператором та реєстрацію результатів експериментів.

Основні вимоги до програмної частини включають:

- реалізацію алгоритму керування процесом дозування рідини;
- можливість налаштування параметрів процесу наливу (завдання маси дозування, час відкриття клапанів, кількість циклів тощо);
- забезпечення автоматичного та ручного режимів роботи стенду;
- відображення стану обладнання та параметрів процесу на інтерфейсі оператора;
- реєстрацію результатів експериментів та збереження отриманих даних;
- можливість подальшого аналізу отриманих експериментальних даних;
- забезпечення зручного інтерфейсу взаємодії оператора зі стендом.

Сформульовані вимоги до апаратної та програмної частин тестового стенду є основою для розроблення експериментальної установки дозування рідин, структура якої розглядається у наступному розділі.

**Архітектура розробленого тестового стенду.** Для проведення експериментальних досліджень процесів дозування рідин було розроблено тестовий стенд, архітектура якого забезпечує можливість відтворення дискретних операцій наливу, керування параметрами процесу та реєстрації результатів експериментів. При розробленні стенду враховано вимоги, сформульовані у попередньому розділі, що дозволило створити гнучку експериментальну установку, придатну для проведення досліджень різних режимів роботи системи дозування [4, 12].

Основу тестового стенду становить апаратно-програмний комплекс, до складу якого входять резервуар із робочою рідиною, система трубопроводів, виконавчі механізми керування потоком рідини, вимірювальні пристрої та система

автоматизованого керування. Взаємодія між елементами стенду здійснюється за допомогою програмованого контролера, який реалізує алгоритми керування процесом наливу та забезпечує обмін даними з операторським інтерфейсом.

На рис. 1 наведено структурну схему розробленого тестового стенду дозування рідин. У складі стенду можна виділити такі основні функціональні підсистеми:

#### 1. Підсистема зберігання та подачі рідини.

До цієї підсистеми входять:

- резервуар гравітаційної подачі GR01 із робочою рідиною;
- індивідуальні резервуари гравітаційної подачі GR02-GR05 для подачі робочих рідин до клапанів мікро-дозування;
- резервуар подачі рідини під дією стабільного тиску PR01;
- трубопровідна система, що забезпечує транспортування рідини до зони наливу;

Конструкція системи подачі дозволяє забезпечити стабільні умови проведення експериментів.

#### 2. Підсистема керування потоком рідини.

Керування процесом наливу здійснюється за допомогою виконавчих механізмів, зокрема пневматичних та електромагнітних клапанів.

Пневматична система стенду забезпечує подачу заданого тиску до пневматичних клапанів керування VS01-VS08 та резервуару PR01.

Відкриття та закриття клапанів здійснюється за командами програмованого контролера відповідно до заданого алгоритму роботи.

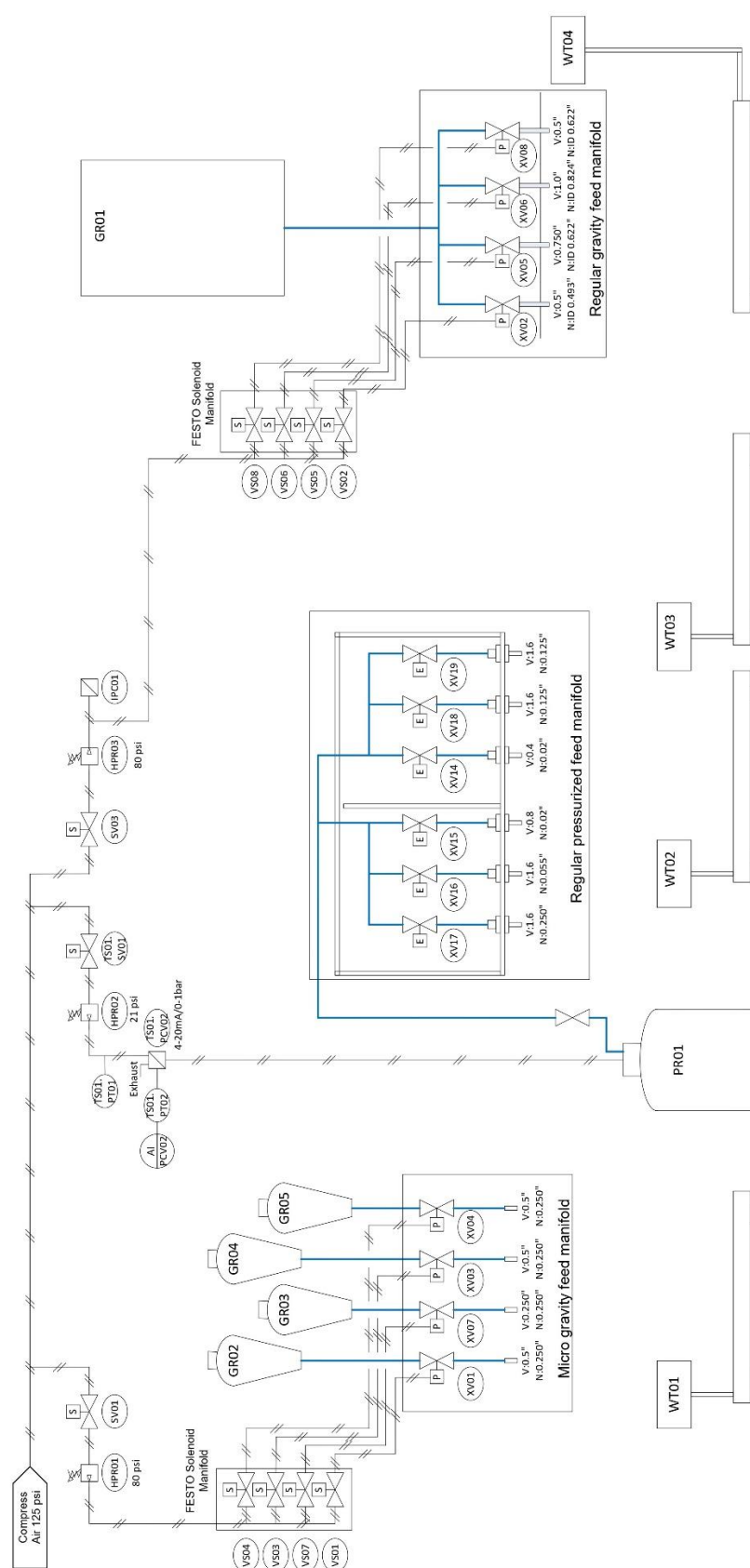


Рисунок 1 – Структурна схема тестового стану дозування рідин

### 3. Підсистема зважування.

Для визначення маси наливої рідини та контролю параметрів процесу у складі стенду використовуються 4 різних типів вагових пристроїв. На ділянці мікродозування використовуються прецизійні ваги WT01 з діапазоном вимірювання від 0 до 600 гр. На ділянці дозування під тиском використовуються ваги WT02 з діапазоном вимірювання до 20 кг та WT03 – до 60 кг. На ділянці гравітаційного дозування використовуються ваги WT04 з діапазоном вимірювання до 20 кг. Отримані дані передаються до системи керування для подальшої обробки та реєстрації.

Використання вагових систем для контролю маси продукту є одним із поширених підходів до підвищення точності процесів дозування [11].

### 4. Підсистема автоматизованого керування (на рисунку не показана).

Центральним елементом системи керування є програмований логічний контролер (ПЛК), який виконує обробку сигналів від датчиків, формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів та забезпечує реалізацію алгоритму дозування рідини.

### 5. Підсистема взаємодії з оператором (на рисунку не показана).

Для керування роботою стенду та відображення інформації про стан процесу використовується операторський інтерфейс (НМІ). За допомогою інтерфейсу оператор може запускати експерименти, змінювати параметри процесу та спостерігати за ходом виконання операцій наливу.

Запропонована архітектура тестового стенду забезпечує можливість проведення експериментальних досліджень процесів дозування рідин, аналізу характеристик наливу та перевірки різних алгоритмів керування. Завдяки модульній структурі стенду можливе подальше розширення його функціональних можливостей шляхом додавання нових датчиків, виконавчих механізмів або програмних модулів.

У наступному розділі розглянуто алгоритм керування процесом наливу, реалізований у програмному забезпеченні тестового стенду.

**Алгоритм керування процесом наливу.** Для забезпечення керованого та відтворюваного процесу дозування у тестовому стенді реалізовано алгоритм керування наливом, який забезпечує поетапне виконання операцій дозування з урахуванням показів вагової системи та параметрів рецепта. Блок-схему алгоритму керування процесом наливу наведено на рис. 2.

Перед початком виконання операції наливу система проходить етап підготовки. На цьому етапі виконуються вибір типу вагової системи, вибір виконавчого клапана, вибір алгоритму наливу (одноетапний або двоетапний), а також типу режиму точного дозування (dribble) [7, 9]. Крім того, параметри рецепта передаються до системи керування, а вагова система проходить процедуру тарування та підготовки до вимірювання.

Після завершення підготовчих операцій алгоритм переходить до встановлення уставок процесу. На цьому етапі формується цільове значення маси продукту, яке повинно бути досягнуто під час наливу. Значення уставки передається до вагового пристрою або компаратора для подальшого контролю процесу дозування.

Далі запускається основна фаза наливу. На першому етапі відкривається керуючий клапан і здійснюється подача продукту до ємності. Налив продовжується до досягнення попередньо визначеної вагової уставки або до виконання умов зупинки, визначених алгоритмом керування.

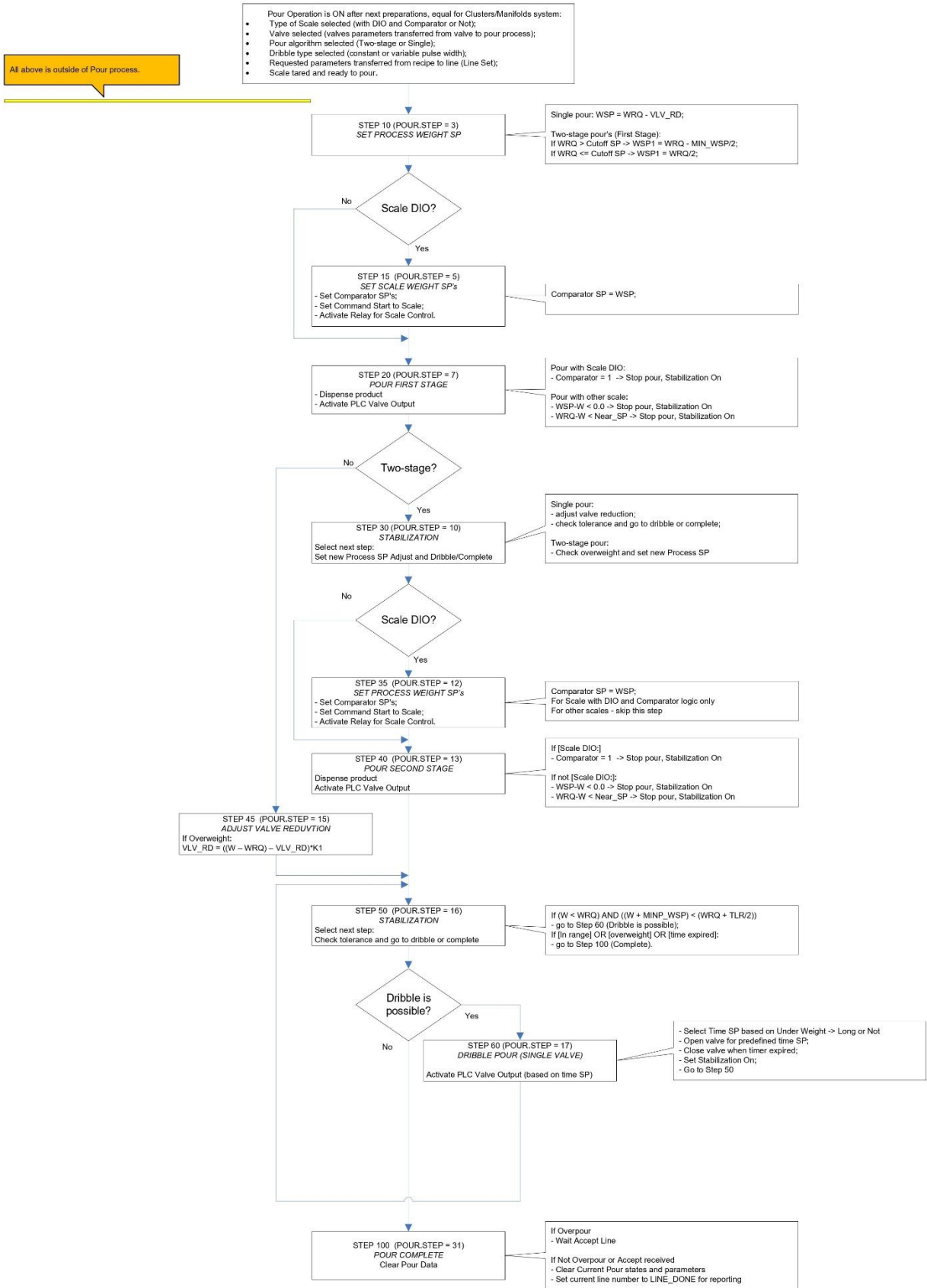


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму керування процесом наливу

Після завершення першої стадії наливу система переходить у режим стабілізації. На цьому етапі виконується короткочасна пауза для стабілізації показів вагової системи та визначення подальших дій алгоритму. Залежно від поточного значення маси продукту система приймає рішення про завершення операції наливу або про необхідність виконання додаткового дозування.

Якщо точність дозування ще не досягнута, алгоритм переходить до режиму точного наливу (dribble). У цьому режимі подача продукту здійснюється короткими імпульсами відкриття клапана [9] або за заданим часовим інтервалом. Після кожного імпульсу проводиться перевірка маси продукту та оцінка відхилення від заданої уставки. Такий підхід дозволяє забезпечити більш високу точність дозування. У разі використання двоетапного алгоритму наливу після завершення першої стадії формується нове значення уставки, після чого виконується друга стадія наливу з меншою інтенсивністю подачі продукту. Після завершення другої стадії також можливе використання режиму точного дозування для досягнення необхідної точності.

Під час виконання алгоритму також передбачено механізм коригування параметрів клапана у випадку перевищення заданої маси продукту. У цьому випадку виконується автоматичне коригування коефіцієнта редукції клапана, що дозволяє зменшити ймовірність повторення перевищення у наступних циклах наливу.

Процес наливу завершується після досягнення заданої маси продукту у межах допустимого діапазону або після виконання умов завершення процесу. Після цього виконується очищення службових параметрів поточного циклу та підготовка системи до виконання наступної операції наливу.

Запропонований алгоритм керування забезпечує гнучкість налаштування параметрів процесу дозування, можливість реалізації одноетапного або двоетапного режиму наливу, а також підвищення точності дозування за рахунок використання режиму точного наливу.

**Основні позначення параметрів алгоритму.** У процесі реалізації алгоритму керування наливом використовуються параметри, що визначають уставки маси продукту, фактичні вимірювання та технологічні обмеження процесу. Основні змінні алгоритму наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні позначення параметрів алгоритму

Позначення	Опис параметра
W	Поточне значення маси продукту у приймальній ємності, виміряне ваговою системою
WRQ	Задана маса продукту (requested weight), яка повинна бути досягнута під час наливу
WSP	Уставка маси для завершення поточного етапу наливу (process weight setpoint)
WSP1	Уставка маси для першого етапу наливу у двоетапному режимі
TLR	Допустиме відхилення маси продукту від заданого значення (tolerance)
Near_SP	Порогове значення наближення до уставки, що використовується для переходу до режиму точного дозування
VLV_RD	Коефіцієнт редуції клапана, що враховує інерційність потоку рідини після закриття клапана
MIN_WSP	Мінімальне значення маси, що використовується для розрахунку уставок першої стадії наливу
MINP_WSP	Мінімальний приріст маси продукту, що враховується при визначенні можливості виконання точного дозування
Cutoff_SP	Порогове значення маси, яке визначає вибір режиму розрахунку уставки першої стадії наливу
K1	Коефіцієнт коригування параметра редуції клапана

**Програмне забезпечення стенду.** Програмне забезпечення тестового стенду призначене для забезпечення автоматизованого керування процесом дозування рідин, взаємодії з оператором та реєстрації параметрів процесу. Архітектура програмного забезпечення реалізована за ієрархічним принципом і включає рівень керування обладнанням, рівень операторського інтерфейсу та рівень управління виробничими даними.

Основними компонентами програмного забезпечення є програмований логічний контролер, система операторського інтерфейсу та сервер управління рецептами і виробничими даними [12].

#### 1. Структура програмного забезпечення

Програмна архітектура тестового стенду складається з декількох взаємодіючих підсистем (наведена на рис. 3):

- рівень керування обладнанням, реалізований у програмованому логічному контролері (PLC);
- рівень візуалізації та операторського керування, реалізований на базі системи НМІ;
- рівень управління рецептами та виробничими даними, реалізований за допомогою системи BatchMetrics.

Обмін даними між компонентами системи здійснюється через промислову мережу Ethernet. PLC забезпечує безпосереднє керування виконавчими механізмами та обробку сигналів від датчиків, тоді як система НМІ забезпечує відображення технологічних параметрів і взаємодію з оператором. Сервер BatchMetrics використовується для конфігурації обладнання, формування рецептів дозування та обробки виробничих замовлень.

Збереження технологічних даних та параметрів процесу здійснюється у базі даних, реалізованій на базі MS SQL Server.

Центральним елементом системи керування є програмований логічний контролер PACSystem Rx3i CPE330, який забезпечує керування фізичними пристроями тестового стенду.

Контролер виконує такі основні функції:

- керування виконавчими механізмами системи дозування;
- обробку сигналів від датчиків вагової системи;
- реалізацію алгоритмів керування процесом наливу;
- контроль станів обладнання та міжблокувань;
- обмін даними з НМІ-системою та сервером виробничих даних.

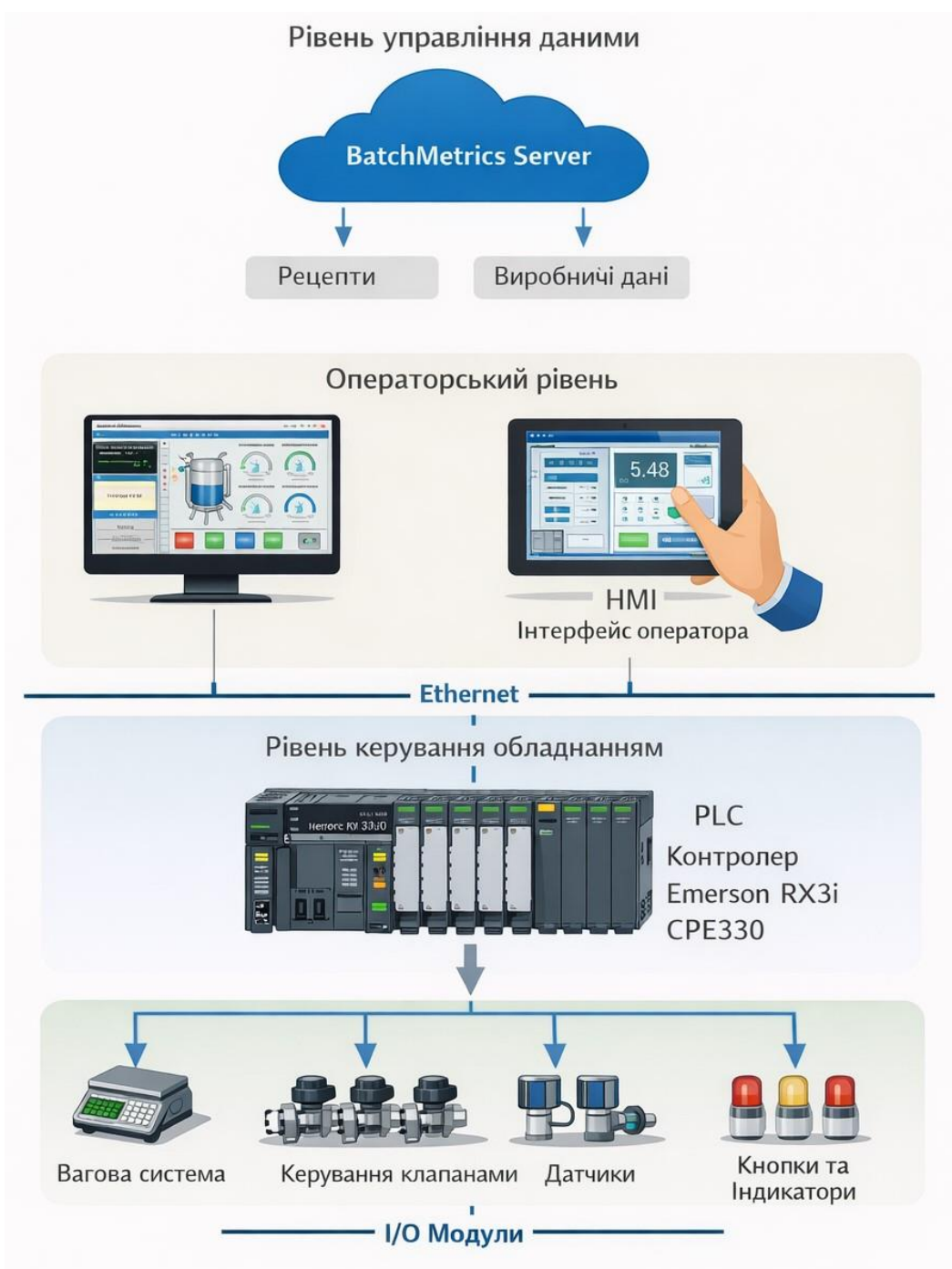


Рисунок 3 – Блок-схему алгоритму керування процесом наливу

## 2. Програмований логічний контролер

PLC підключений до мережі автоматизації через Ethernet та Profinet, що забезпечує взаємодію з віддаленими модулями вводу-виводу, ваговими пристроями та іншими компонентами системи. Розширення системи вводу-виводу реалізовано за

допомогою віддалених модулів, які забезпечують обробку аналогових та дискретних сигналів.

Програмне забезпечення контролера розроблене з використанням мови програмування LD та ST, які належать до стандарту програмування промислових контролерів IEC 61131-3, та реалізує послідовність технологічних операцій наливу відповідно до обраного алгоритму дозування. Залежно від режиму роботи система може виконувати операції наливу автоматично за рецептом або у ручному режимі з введенням параметрів оператором.

### 3. Інтерфейс оператора (НМІ)

Взаємодія оператора з тестовим стендом здійснюється за допомогою системи операторського інтерфейсу, реалізованої на базі програмного забезпечення GE Simplicity HMI.

НМІ-система виконує такі функції:

- відображення поточного стану технологічного процесу;
- відображення значень технологічних параметрів у режимі реального часу;
- відображення аварійних повідомлень та сигналів тривоги;
- введення параметрів процесу та уставок;
- керування режимами роботи стенду;
- запуск, призупинення та зупинка процесу наливу.

Операторський інтерфейс інтегрований із сервером виробничих даних, що забезпечує можливість роботи з виробничими замовленнями та рецептами дозування.

На екранах операторського інтерфейсу відображаються також повідомлення про аварійні ситуації та стан технологічного обладнання, що дозволяє оператору оперативно реагувати на зміни умов роботи системи.

**Висновки.** У роботі розглянуто питання формування вимог до тестового стенду дозування рідин, призначеного для дослідження дискретних процесів наливу в автоматизованих системах дозування.

На основі аналізу особливостей процесів дозування рідин сформульовано основні вимоги до апаратної та програмної частин експериментального стенду, які забезпечують можливість проведення досліджень процесів наливу в різних режимах роботи системи. Запропоновано архітектуру тестового стенду, що включає підсистеми подачі рідини, керування потоком, зважування та автоматизованого керування.

Розроблено алгоритм керування процесом наливу, який забезпечує виконання послідовності технологічних операцій дозування з використанням показів вагової системи та заданих параметрів процесу. Алгоритм підтримує одноетапний та двоетапний режими наливу, а також режим точного дозування з імпульсним керуванням клапаном, що дозволяє підвищити точність досягнення заданої маси продукту.

Описано структуру програмного забезпечення тестового стенду, яка базується на використанні програмованого логічного контролера, операторського інтерфейсу та системи керування виробничими даними. Така архітектура забезпечує можливість гнучкого налаштування параметрів процесу дозування, реалізації різних алгоритмів керування та реєстрації результатів експериментів.

Показано, що розроблений тестовий стенд може бути використаний як експериментальна платформа для дослідження процесів дозування рідин, аналізу характеристик наливу, перевірки алгоритмів керування та вдосконалення автоматизованих систем дозування.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Ayaz M., Yüksel H., Erden K. Flowmeter-free chemical dosing control system: A new volume measurement-based design. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102480>
2. Phukapak C., Tontiwachwuthikul P., Idem R. Comparison of desirability function (DF) and overall equipment effectiveness (OEE) with mathematical model for optimization in fruit juice production process. *Cogent Engineering*, 2024. 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2412365>

3. Artiymov M., Kaliuzhnyi O. Study of the operation of a liquid dosing device with an air-hydraulic valve. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 2025. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-41-03-025>
4. Zhang Y., Wang Y., Chen B. Design and experimental study of a high-precision liquid filling control system. *Machines*, 2023. Vol. 11. Issue 7. <https://doi.org/10.3390/machines11070692>
5. Hinkers M., et al. Comprehensive assessment of liquid filling technologies for industrial applications. *Batteries*, 2025. Vol. 11. Issue 2. <https://doi.org/10.3390/batteries11020041>
6. Liu F., Hutchinson R. Visible particles in parenteral drug products: current safety assessment practice. *Current Research in Toxicology*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.crtox.2024.100175>
7. Курдюмов Д. С., Кунченко Т. Ю. Моделювання процесів дозування рідин в автоматизованих системах. *Електротехніка і електромеханіка*, 2025. <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.06.02>
8. Sampathkumar K., Kerwin B. Roadmap for drug product development and manufacturing of biologics. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2023.11.004>
9. Medvedev A., Proskurnikov A., Zhusubaliyev Z. Impulsive feedback control: analysis and applications. *European Control Conference (ECC)*, 2024. <https://doi.org/10.23919/ECC64448.2024.10591161>
10. Курдюмов Д. С., Кунченко Т. Ю., Дослідження алгоритмів дискретного керування в системах дозування. *Електротехніка і електромеханіка*, 2025. <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.07.01>
11. Wang C., et al. Accuracy Analysis of Slurry Characterization in a Rectifying Liquid Concentration Detection System. *Processes*, 2025. Vol. 13. <https://doi.org/10.3390/pr13051421>
12. Srinath V, Dr. Guruswamy K. P. «Design and Implementation of a PLC-Based Automatic Liquid Mixing and Filling System» *Iconic Research And Engineering Journals*, 2026. Volume 9. Issue 8. P. 233–239 <https://doi.org/10.64388/IREV9I8-1714060>

#### REFERENCES:

1. Ayaz M., Yüksel H., Erden K. Flowmeter-free chemical dosing control system: A new volume measurement-based design. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102480>
2. Phukapak C., Tontiwachwuthikul P., Idem R. Comparison of desirability function (DF) and overall equipment effectiveness (OEE) with mathematical model for optimization in fruit juice production process. *Cogent Engineering*, 2024. 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2412365>.
3. Artiymov M., Kaliuzhnyi O. Study of the operation of a liquid dosing device with an air-hydraulic valve. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 2025. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-41-03-025>
4. Zhang Y., Wang Y., Chen B. Design and experimental study of a high-precision liquid filling control system. *Machines*, 2023, Vol. 11. Issue 7. <https://doi.org/10.3390/machines11070692>
5. Hinkers M., et al. Comprehensive assessment of liquid filling technologies for industrial applications. *Batteries*, 2025, Vol. 11. Issue 2. <https://doi.org/10.3390/batteries11020041>
6. Liu F., Hutchinson R. Visible particles in parenteral drug products: current safety assessment practice. *Current Research in Toxicology*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.crtox.2024.100175>
7. Kurdiymov D., Kunchenko T. Modeling of liquid dosing processes in automated systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025. <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.06.02>
8. Sampathkumar K., Kerwin B. Roadmap for drug product development and manufacturing of biologics. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2023.11.004>
9. Medvedev A., Proskurnikov A., Zhusubaliyev Z. Impulsive feedback control: analysis and applications. *European Control Conference (ECC)*, 2024. <https://doi.org/10.23919/ECC64448.2024.10591161>

10. Kurdiumov D., Kunchenko T. Investigation of discrete control algorithms in dosing systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025. <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.07.01>
11. Wang C., et al. Accuracy Analysis of Slurry Characterization in a Rectifying Liquid Concentration Detection System. *Processes*, 2025. Vol. 13. <https://doi.org/10.3390/pr13051421>
12. Srinath V, Dr. Guruswamy K. P. «Design and Implementation of a PLC-Based Automatic Liquid Mixing and Filling System» *Iconic Research And Engineering Journals*, 2026. Volume 9. Issue 8. P. 233–239 <https://doi.org/10.64388/IREV9I8-1714060>

*Стаття надійшла до редакції: 03.03.2026; рецензування: 19.03.2026;*

*прийнята до публікації 27.03.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.*

*The article was submitted on 03.03.2026; revised on 19.03.2026; and accepted for publication on 27.03.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.*