

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 Юріївна, 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*

ВИБІР ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕСТОВОГО СТЕНДУ ДОЗУВАННЯ РІДИН

Анотація. Метою статті є вибір та обґрунтування методу математичного моделювання тестового стенду дозування рідин за ваговим принципом як дискретно-подієвої системи з паралельними процесами. Запропоновано критерії відбору методів (відповідність дискретно-подієвій природі, підтримка паралелізму, можливості формальної верифікації, наявність інструментів, придатність до імплементації в PLC/SCADA) та проведено порівняльний аналіз підходів: FSM, алгоритмічне програмування (ST/LD/FBD), графи переходів/станів, системна динаміка, DEVS, BPMN/SFC та мережі Петрі. Показано, що мережі Петрі найповніше задовольняють визначені критерії для задач керування процесом наливу: природно відтворюють паралелізм і синхронізацію, дозволяють моделювати ресурсні конфлікти, а також підтримують формальну верифікацію (досяжність, живучість, відсутність тупиків). Наведено фрагмент моделі PN для підпроцесу «налив → стабілізація → контроль» та окреслено перехід до таймованих і кольорових PN для відображення часових затримок і типізованих токенів. Практичний внесок полягає в узгодженні моделі з інструментами CPN Tools/PIPE/TAPAAL/HPetriSim і в рекомендаціях щодо мапування PN на логіку IEC 61131-3 для подальшої інтеграції в PLC/SCADA. Результати можуть бути використані для проектування, верифікації та HiL/SiL-тестування алгоритмів дозування на експериментальних і напівпромислових стендах.

Ключові слова: методи математичного моделювання, дискретні динамічні системи, дозування рідин за вагою, мережі Петрі; скінченні автомати, DEVS, BPMN/SFC, формальна верифікація, паралелізм процесів, PLC/SCADA.

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.*

SELECTION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELING METHODS FOR A LIQUID DOSING TEST BENCH

Abstract. *The paper aims to select and justify an appropriate mathematical modelling method for a weight-based liquid dosing test bench considered as a discrete-event system with parallel processes. We introduce selection criteria (fitness to discrete-event nature, parallelism support, formal verification capabilities, tool availability, and PLC/SCADA implementability) and provide a comparative assessment of seven approaches: finite state machines (FSM), algorithmic programming (ST/LD/FBD), state/transition graphs, system dynamics, DEVS, BPMN/SFC, and Petri nets. The analysis shows that Petri nets best meet the criteria for dosing control: they naturally capture parallelism and synchronization, enable modelling of resource conflicts, and support formal verification (reachability, liveness, deadlock-freedom). A Petri-net fragment is presented for the “pouring → stabilization → control” subprocess, with a roadmap to timed and coloured PN to represent delays and typed tokens. The practical contribution is an alignment of the model with CPN Tools/PIPE/TAPAAL/HPetriSim and guidance on mapping PN to IEC 61131-3 logic for subsequent PLC/SCADA integration. The results are applicable to the design, verification, and HIL/SIL testing of dosing algorithms on experimental and pilot-scale benches.*

Keywords: *mathematical modelling method, discrete dynamic systems, discrete-event systems, gravimetric liquid dosing, Petri nets, timed/colored Petri nets, DEVS; finite state machines; BPMN/SFC; formal verification; process parallelism; PLC/SCADA integration.*

Вступ. Автоматизовані системи дозування рідин відіграють ключову роль у багатьох галузях промисловості – від фармацевтики до харчової промисловості та енергетики. Особливої актуальності набуває розробка і дослідження тестових стендів, які дозволяють відпрацьовувати та оптимізувати алгоритми дозування у лабораторних або напівпромислових умовах. Серед різноманітних методів контролю кількості рідини, ваговий метод дозування є одним з найточніших і найбільш технологічно адаптивних до автоматизації [1].

З точки зору системного підходу, процес дозування рідин за ваговим принципом може бути формалізований як дискретна динамічна система з паралельними процесами. Відповідно до сучасних визначень, дискретна динамічна система (ДДС) – це система, стан якої змінюється у визначені моменти часу внаслідок подій або керуючих впливів, і яка може бути описана скінченною множиною станів, переходів і подій [2].

Паралельність у роботі стенду проявляється як одночасність незалежних підпроцесів: паралельне зважування однієї лінії та підготовка наливу в іншій,

регулювання тиску незалежно від стану дозування, асинхронний контроль аварійних умов. Таку поведінку зручно моделювати формалізмами, що вбудовано підтримують паралельність і синхронізацію [7].

У попередніх роботах, зокрема у [3], продемонстровано, що архітектура автоматизованого стенду дозування дозволяє ідентифікувати щонайменше п'ять паралельно функціонуючих процесів, кожен з яких може бути описаний як підсистема зі своєю логікою переходів і умовами активації. Така структура природно піддається формалізації у вигляді мереж Петрі, що добре зарекомендували себе для моделювання дискретних подієвих систем [4].

Ураховуючи ці характеристики, виникає необхідність у системному аналізі існуючих методів математичного моделювання дискретних динамічних систем з паралельними процесами з метою вибору найбільш адекватного інструментарію для моделювання тестового стенду дозування рідин. У цій статті здійснюється вибір та порівняльний аналіз відповідних методів, зокрема з фокусом на мережі Петрі [5], які розглядаються як основа для побудови моделі досліджуваного об'єкта.

Постановка задачі та характеристика досліджуваного об'єкта. Об'єктом дослідження є експериментальний стенд для тестування алгоритмів дозування рідин, який складається з декількох функціонально взаємопов'язаних підсистем. Зокрема, до його складу входять: підсистема керування на базі програмованого логічного контролера (ПЛК), система людино-машинного інтерфейсу (НМІ), підсистема зберігання рідини, підсистема керування тиском, група клапанів різного типу, а також підсистема зважування із підтримкою декількох типів інтерфейсів. Стенд функціонує у кількох режимах – автоматичному, ручному та діагностичному – і підтримує реалізацію різних стратегій наливу рідини.

З точки зору системного підходу, стенд може бути формалізований як дискретна динамічна система (ДДС), оскільки його поведінка описується через зміни станів, що відбуваються у визначені моменти часу в результаті подій (спрацювання сенсорів, керуючі сигнали, зміна логічних умов). Стан системи в кожен момент

можна охарактеризувати скінченним набором змінних, що визначають положення клапанів, стан дозування, значення ваги тощо. Подібна класифікація широко застосовується при аналізі дискретно-подієвих систем у галузі автоматизації та кіберфізичних систем керування [6].

Ключовою особливістю даного стенду є паралельність процесів, яка проявляється у здатності виконувати одночасно кілька операцій – наприклад, зважування в одній лінії, підготовка наливу в іншій, керування тиском у третій тощо. Підсистеми функціонують частково незалежно, однак у загальній системі з координованою логікою. Такі системи типові для виробничих середовищ, де важлива не лише правильна послідовність дій, але й їхня взаємна узгодженість у часі [7].

З огляду на ці характеристики, постає завдання вибору методу моделювання, який би враховував дискретність, подієвість і паралельність поведінки системи. Однією з ефективних парадигм для таких задач є використання мереж Петрі, які мають широку підтримку в науковій спільноті, зокрема при моделюванні технічних процесів у автоматизованих та розподілених системах [5].

Таким чином, формалізація поведінки тестового стенду як ДДС з паралельними процесами є підґрунтям для подальшого аналізу та вибору адекватного методу математичного моделювання, що розглядатиметься у наступних розділах.

Критерії вибору методу математичного моделювання. Вибір методу математичного моделювання для дослідження та формалізації поведінки тестового стенду має ґрунтуватися на узгодженні властивостей об'єкта із можливостями конкретного формалізму. У контексті дискретно-подієвих систем з паралельними процесами, як у нашому випадку, можна виділити п'ять основних критеріїв вибору, що дозволяють провести обґрунтовану оцінку придатності методу математичного моделювання:

- 1) Відповідність дискретно-подієвій природі процесу.

Оскільки поведінка тестового стенду визначається послідовністю дискретних подій (зміна стану клапанів, запуск алгоритму дозування, стабілізація ваги, досягнення цільового рівня), модель має мати можливість описувати логіку зміни станів на основі подієвого підходу. Методи, що базуються на неперервних рівняннях або системній динаміці, не забезпечують належної точності в описі таких систем. Натомість мережі Петрі дозволяють природно представити множину дискретних станів і подій, зокрема у вигляді місць, переходів та маркерів [8].

2) Підтримка паралельного виконання.

Досліджуваний стенд характеризується значною кількістю паралельно функціонуючих процесів: дозування у різних лініях, регулювання тиску, обробка сигналів від датчиків тощо. У традиційних алгоритмічних моделях реалізація паралелізму потребує складної логіки синхронізації. Натомість у мережах Петрі паралелізм є вбудованою властивістю – незалежні переходи можуть активуватись одночасно за відповідних умов, що значно полегшує моделювання багатопоточних процесів [9].

3) Можливість верифікації логіки та діагностики станів.

Для забезпечення надійної роботи системи необхідно верифікувати логіку її функціонування: виявляти можливі тупикові стани, зациклення, конфлікти доступу до ресурсів. Обраний метод має підтримувати формальну перевірку властивостей моделі, таких як живучість, безконфліктність та досяжність. Інструменти моделювання на базі мереж Петрі (наприклад, такі програмні продукти як PIPE, TAPAAL, CPN Tools) підтримують вбудовані засоби перевірки вказаних властивостей [10].

4) Наявність інструментальних засобів моделювання.

Метод має бути підтриманий широким набором засобів автоматизованого моделювання, що забезпечують графічне представлення, симуляцію та формальну верифікацію моделей. Для мереж Петрі доступна низка стабільних і перевірених рішень, серед яких найбільш відомими є CPN Tools, Renew, TimeNet, GPenSIM. Такі

засоби активно застосовуються як у наукових дослідженнях, так і у промисловій автоматизації [9].

5) Придатність до подальшої реалізації в PLC/SCADA.

Оскільки результати моделювання мають бути інтегровані у реальні системи керування, важливо, щоб модель була інтуїтивно зрозумілою для трансляції у мову програмування ПЛК або сценарії SCADA-систем. Використання мереж Петрі як логічного рівня опису дозволяє уникнути помилок при реалізації алгоритмів та полегшує процес верифікації програмного коду.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що модель має бути подієво-орієнтованою, підтримувати паралельну поведінку, мати інструменти для аналізу та бути практично орієнтованою на імплементацію. Згадані властивості дозволяють вважати мережі Петрі одним із найбільш придатних методів моделювання таких систем.

Огляд і порівняльний аналіз методів моделювання. Математичне моделювання дискретних динамічних систем може виконуватись за різними підходами, кожен з яких має власну область ефективності, набір інструментів і ступінь придатності для задач автоматизації. Далі наведено короткий, але змістовний опис семи поширених методів.

1. Метод скінченних автоматів (Finite-state machine (FSM))

Скінченні автомати моделюють систему як скінченну множину станів із переходами, що спрацьовують від входніх подій. Формалізм добре підтримує детерміновану послідовну логіку, граничні умови та прості взаємозв'язки між станами. Розширення на кшталт ієрархічних або розширених автоматів (з контекстними змінними) підвищують виразність, але ускладнюють аналіз. Зі зростанням кількості сценаріїв виникає «вибух станів», що погіршує масштабованість. FSM зручні для специфікації протоколів і послідовностей у вбудованих/PLC-системах, але менш придатні для природного відображення паралельних процесів.

Переваги: простота реалізації, інтуїтивність для опису послідовних алгоритмів, наявність підтримки в UML та PLC-мовах.

Недоліки: слабка масштабованість, «вибух станів» при додаванні нових сценаріїв.

Приклади застосування: керування послідовністю технологічних операцій, діагностика аварійних сценаріїв у ПЛК [11].

Інструменти: UML Statecharts, MATLAB Stateflow, Yacindu Statechart Tools.

2. Алгоритмічне програмування (ST, LD, FBD)

Мови IEC 61131-3 орієнтовані на циклічне виконання та по-дієве сканування задач у PLC. Забезпечується пряма відповідність між логікою моделі та апаратною частиною, зрозумілий інженерний життєвий цикл і тісна інтеграцію зі SCADA. Водночас ці мови – насамперед засіб реалізації, а не формальної верифікації: паралелізм проектується вручну через задачі/переривання, а перевірка коректності спирається на тестування та зручний перегляд коду. Тому IEC-моделі доцільно використовувати як кінцевий етап після попереднього формального моделювання.

Переваги: висока сумісність із промисловими контролерами, зручність інтеграції з SCADA, відпрацьовані інженерні методики.

Недоліки: обмежені можливості для формального аналізу та моделювання паралелізму.

Приклади застосування: програмування ліній розливу, керування насосними станціями.

Інструменти: Rockwell Studio 5000, Emerson Proficy Machine Edition, Siemens TIA Portal [12].

3. Графи переходів/станів

Графи переходів/станів узагальнюють метод FSM, додаючи охоронні умови та дії на переходах, що робить модель більш наочною для системної логіки. Ієрархія та композиція (напр. у Statecharts) покращують структурованість великих моделей, а орторегіони, як конструкція для моделювання паралельних підсистем у рамках

одного стану в графах переходів/станів, дають обмежену підтримку паралельності. Однак без формалізації семантики й автоматизованих перевірок графи схильні до помилок синхронізації та «злиття» сценаріїв. Тому вони корисні як проміжне подання вимог і архітектури логіки, але не замінюють формальних засобів верифікації.

Переваги: наочність, можливість опису складних логічних зв'язків.

Недоліки: обмежений опис паралельних процесів, складність верифікації у великих моделях.

Приклади застосування: проектування систем сигналізації та блокування у промислових процесах.

Інструменти: Enterprise Architect, Visual Paradigm [13].

4. Метод системної динаміки

Системна динаміка оперує запасами, потоками та петлями зворотного зв'язку, розв'язуючи систему диференціальних рівнянь у часі. Підхід ефективний для макрорівневих, неперервних або квазінеперервних явищ: інвентарів, витрат, трендів попиту. Для дискретно-подієвих процесів із синхронізацією подій та взаємним блокуванням метод менш доречний: події доводиться апроксимувати або комбінувати з дискретними формалізмами. У задачі дозування рідин корисний для грубого відтворення гідродинаміки/тиску, але не для точного опису подій.

Переваги: добре підходить для довгострокового прогнозування та аналізу трендів.

Недоліки: відсутність природного механізму подієвого моделювання, що обмежує застосування у задачах на кшталт нашого стенду.

Приклади застосування: прогнозування споживання ресурсів, аналіз виробничої динаміки.

Інструменти: Vensim, Stella Architect [14].

5. Discrete Event System Specification (DEVS)

DEVS – строгий формалізм із розділенням на атомарні та складені (coupled) моделі, визначені портами, функціями переходів і часовими авансами. Його сила – у модульності, повторному використанні компонент і масштабуванні за рахунок ієрархії; модель виконується дискретно за подіями, що добре відповідає складним системам. Недоліки – вищий поріг входу та слабша інтеграція з PLC-інструментами. Часто застосовується у симуляції логістики, мереж або кібер-фізичних систем, де потрібна точна по-дієва семантика.

Переваги: строгий математичний апарат, підтримка часових затримок і багаторівневої структури.

Недоліки: висока складність реалізації, обмежена підтримка у PLC-середовищах.

Приклади: моделювання логістичних систем, телекомунікаційних мереж.

Інструменти: PowerDEVS, MS4 Me [15].

6. Нотація моделювання бізнес-процесів (Business Process Model and Notation (BPMN) / Схема послідовного функціонування (Sequential Function Chart (SFC))

BPMN забезпечує зрозуміле графічне подання процесів із подіями, шлюзами, потоками робіт та ролями, що полегшує комунікацію між командами. SFC (IEC 61131-3) описує керування як послідовність кроків і переходів з діями, що природно мапується на ПЛК. Обидва підходи добре документують алгоритми, але мають обмежену формальну семантику та слабкі засоби верифікації; паралелізм описується спрощено, тож для складних взаємодій потрібна комбінація з формальними моделями.

Переваги: зрозумілий графічний формат, легка комунікація між інженерами та менеджерами.

Недоліки: відсутність формальної верифікації та повноцінної підтримки паралелізму.

Приклади: візуалізація алгоритмів у проектах автоматизації з участю кількох команд.

Інструменти: Camunda Modeler, PLC-редактори з підтримкою SFC [16].

7. Мережі Петрі (класичні, кольорові, ієрархічні тощо, Petri Net (PN))

Мережі Петрі подають стани як місця з маркерами, а події – як переходи; така семантика природно відтворює паралельність, синхронізацію та конфлікти за ресурси. Кольорові мережі підвищують виразність за рахунок типів/даних, таймовані (розширення класичних мереж Петрі, у якому враховується час виконання переходів або тримання токенів у позиціях) – вводять часові затримки, ієрархічні – полегшують масштабування. Розвинуті методи аналізу (досяжність, живучість, виявлення тупиків) і зрілий інструментарій роблять PN зручними для верифікації логіки керування. У задачі дозування рідин PN дають прозору картину взаємодії ліній наливу, вагів і обмежених ресурсів.

Переваги: природна підтримка паралелізму, можливість формальної верифікації, моделювання ресурсних обмежень.

Недоліки: початкова складність засвоєння для інженерів без досвіду в теорії формальних моделей.

Приклади використання: моделювання виробничих ліній, керування багатопоточними процесами в автоматизації [17].

Інструменти: CPN Tools, PIPE, TAPAAL.

В табл. 1 наведемо узагальнене порівняння семи підходів до моделювання (FSM, ST/LD/FBD, графи станів, системна динаміка, DEVS, BPMN/SFC, мережі Петрі) за п'ятьма критеріями: дискретність, паралельність, верифікація, інструменти, придатність до PLC/SCADA.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз методів моделювання за критеріями

Метод моделювання	Дискретність	Паралельність	Верифікація	Інструменти	PLC/SCADA
Скінченні автомати (FSM)	+	–	±	UML, Stateflow	±
Алгоритмічне програмування (ST/LD/FBD)	+	±	–	PLC IDE	+

Метод моделювання	Дискретність	Паралельність	Верифікація	Інструменти	PLC/SCADA
Графи переходів/станів	+	±	±	Graph tools	±
Системна динаміка	–	±	±	Vensim, Stella	–
DEVS	+	+	+	PowerDEVS, MS4 Me	±
BPMN / SFC	±	±	–	Camunda, PLC SFC	±
Мережі Петрі	+	+	+	CPN Tools, PIPE, TAPAAL	+

В табл. 1 символи мають таке значення: «+» – висока відповідність; «±» – обмежена/часткова відповідність; «–» – відсутня або низька відповідність.

Семантика PN безпосередньо підтримує паралельне виконання: незалежні переходи можуть спрацьовувати одночасно за наявності маркерів у відповідних місцях, а синхронізація і взаємодія процесів реалізуються через спільні місця та ресурсні обмеження. Це робить PN придатними для опису одночасної роботи підсистем стенду (налив, зважування, регулювання тиску), у тому числі при конфліктах доступу до клапанів чи вагових каналів та при координації між лініями наливу. Ієрархічні та кольорові мережі забезпечують масштабованість моделі за зростання кількості каналів і сценаріїв [17], [5].

Графічне подання PN забезпечує прозору візуалізацію логіки переходів і причинно-наслідкових зв'язків, що полегшує трасування сценаріїв, рецензування логіки керування та комунікацію між розробниками ПЛК/НМІ. На відміну від суто текстових алгоритмів, PN дозволяють явно відстежувати умови спрацьовування, конкуренцію за ресурси та можливі «вузькі місця», що особливо важливо для експериментальної відпрацювання алгоритмів дозування [5].

Для PN існує усталений апарат формального аналізу: граф досяжності, інваріанти P/T, перевірка обмеженості, живучості та відсутності тупиків. Зрілий інструментарій (CPN Tools, PIPE, TAPAAL) надає можливості симуляції, перевірки

властивостей і пошуку конфліктів до етапу імплементації в PLC/SCADA, знижуючи ризики зациклення або блокувань у реальному виконанні [5]. Кольорові мережі, зокрема, довели ефективність для моделювання, валідації та побудови випробувальних сценаріїв у технічно й регуляторно чутливих системах, що підтверджує їхню придатність і для задач дозування рідин, де критичними є коректність логіки та безпека [5].

Таким чином, PN задовольняють ключові вимоги до моделі тестового стенду: подієвість і дискретність, вбудований паралелізм, наочність відображення логіки, підтримку формальної верифікації та наявність інструментів, а також демонструють успішні застосування у споріднених промислових кейсах. Це обґрунтовує вибір PN як базового засобу для подальшого моделювання, аналізу й підготовки до реалізації в PLC/SCADA [17], [5].

Побудова фрагменту моделі мережі Петрі для тестового стенду. Мережа Петрі задається у вигляді маркованого двочасткового орієнтованого графу[7], [5]. Розрізняють два типи вершин: позиції (позначаються колами) і переходи (позначаються смужками). МП може бути формально подана у вигляді як сукупність множин: , де

- множина всіх позицій (– кількість позицій);
- множина переходів (– кількість переходів);
- множина дуг мережі: , – множини дуг, що ведуть відповідно від переходів до позицій і від позицій до переходів (дуг, що з'єднують однорідні вершини, не існує);
- множина ваг дуг (– кількість дуг).

В цій роботі розглянемо підпроцес «налив → стабілізація → контроль» як один паралельних процесів наливу рідини на ваги у вигляді мережі Петрі з множиною місць, яку можна записати як $P = \{P0, ..., P7\}$ та переходів $T = \{T0, ..., T11\}$. Початкова (initial) розмітка: $M_0(P0) = 1$, інші місця порожні.

Семантика місць відповідає станам технологічного процесу:

- Початкова позиція (Initial state) P0

- Початковий імпульс (Start pulse) P1
- Тарування ваг (Tare Scale) P2
- Затримка старту (Start delay)..... P3
- Налив з високою швидкістю (Coarse pour) P4
- Налив з низькою швидкістю (Fine pour) P5
- Стабілізація після завершення безперервного наливу,
та після кожного імпульсу (Stabilization)..... P6
- Імпульсний налив – перший та інші імпульси (Dribble) P7

Переходи відтворюють події та умови: команда старту, підтвердження тарування, досягнення порогів маси, перемикання швидкостей, завершення циклу тощо.

Структуру дуг задаємо безпосередньо з технологічної специфікації переходів:

- Старт 1 – перехід з P0 до P1 (команда старт) T0
- Старт 2 – перехід від P0 до P2 (в обхід P1)..... T1
- Імпульс 0 – перехід від P1 до P6..... T2
- Зупинка 0 – перехід від P6 до P2 T3
- Тара ОК 1 – перехід від P2 до P3..... T4
- Тара ОК 2 – перехід від P2 до P4 (без затримки)..... T5
- Зміна швидкості – перехід від P4 до P5 T6
- Зупинка 1 – перехід від P5 до P6 T7
- Зупинка 2 – перехід від P4 до P6 (без зміни швидкості) T8
- Імпульс – перехід від стабілізації до першого імпульсу..... T9
- Зупинка 3 – перехід від імпульсу до стабілізації..... T10
- Завершення – перехід від стабілізації до початку T11

Таким чином підпроцес охоплює два режими безперервного наливу (coarse/fine) з подальшим переходом до імпульсного режиму наливу та обов'язковою

стабілізацією між імпульсами. Така інтерпретація уможливорює аналіз досяжності, живучості та відсутності тупиків до імплементації в PLC/SCADA.

Логіка контролю маси реалізується умовами спрацьовування переходів:

- T6 активується при досягненні «межі переключення» ($m \geq m_{\text{coarse_off}}$);
- T7 або T8 – при досягненні порога зупинки безперервного наливу;
- T9 – за умови «стабільність» = TRUE та $m < m_{\text{SP}}$;
- T10 – після завершення імпульсу або по таймеру;
- T11 – коли «стабільність» = TRUE та $m \in [m_{\text{SP}} \pm \Delta]$.

де m – поточне значення ваги;

$m_{\text{coarse_off}}$ – маса перемикавання з більшої швидкості наливу на меншу;

m_{SP} – завдане значення поточного наливу;

Δ – завдане відхилення (точність) наливу.

Затримки старту й стабілізації доцільно реалізовувати часовими переходами (зокрема, для T4: $P2 \rightarrow P3$ і для циклу $P6 \leftrightarrow P7$), що дозволяє відобразити інерційність ваг та фільтрацію шуму.

Паралельне виконання відображається двома способами. По-перше, незалежні під-процеси у межах фрагмента (безперервний налив проти імпульсного доливу) моделюються конкурентними переходами (наприклад, у P6 можуть бути одночасно дозволені T9 і T11 – вибір визначається умовами й пріоритетами). По-друге, в розширеній моделі легко додати паралельні підсистеми як окремі підмережі, що синхронізуються спільними місцями-ресурсами: «готовність тиску», «доступність клапана», «канал зважування вільний». Це зберігає прозорість логіки та дозволяє аналізувати конфлікти і блокування між лініями.

Графічне представлення у стилі HPetriSim представлено на рис. 1:

- створюємо місця P0...P7 з підписами,
- переходи T0...T11 з назвами подій,
- проводимо дуги за наведеними парами «джерело $\rightarrow$ призначення»,
- задаємо початкову мітку в P0; для T3, T4, T9, T10, T11 (та, за потреби, T6)

- встановлюємо часові параметри.

HPetriSim підтримує місткості місць, ваги дуг і часові переходи, що дає змогу відтворити затримки стабілізації та контрольні вікна; для формального аналізу (досяжність, тупики) модель можна експортувати у PNML й перевірити інструментами на кшталт PIPE 2.7 [18], [19].

Висновки. Тестовий стенд дозування рідин формалізується як дискретно-подієва динамічна система з паралельними процесами. Порівняння підходів (FSM, ST/LD/FBD, графи станів, системна динаміка, DEVS, BPMN/SFC, мережі Петрі) показало: класичні інженерні засоби зручні для реалізації та документації, але обмежені у відображенні паралелізму та формальній верифікації. DEVS забезпечує строгість і модульність, однак має вищий поріг впровадження у PLC-середовища. Мережі Петрі забезпечують природну подієво-орієнтовану семантику, підтримку паралелізму, конфліктів і ресурсних обмежень, а також усталений інструментарій аналізу.

Мережі Петрі відповідають усім ключовим вимогам: адекватно описують стани й події процесу наливу, дозволяють моделювати конкурентні й синхронізовані операції між підсистемами, мають прозору візуалізацію логіки переходів для спільної інженерної роботи, підтримують формальну перевірку властивостей (досяжність, живучість, відсутність тупиків/зациклень), легко розширюються до кольорових, таймованих та ієрархічних варіантів, що важливо для масштабування моделі.

Усвідомлюючи перспективи розширення моделі, симуляції, експериментальної перевірки та інтеграції з ПЛК/SCADA, можна збудувати план подальших робіт:

- розширення моделі до багатоканального наливу з урахуванням обмежених ресурсів і пріоритетів;
- перехід до таймованих/кольорових PN для відтворення стабілізації ваги, затримок і калібрувальних параметрів;
- симуляцію сценаріїв із оцінкою продуктивності та надійності;

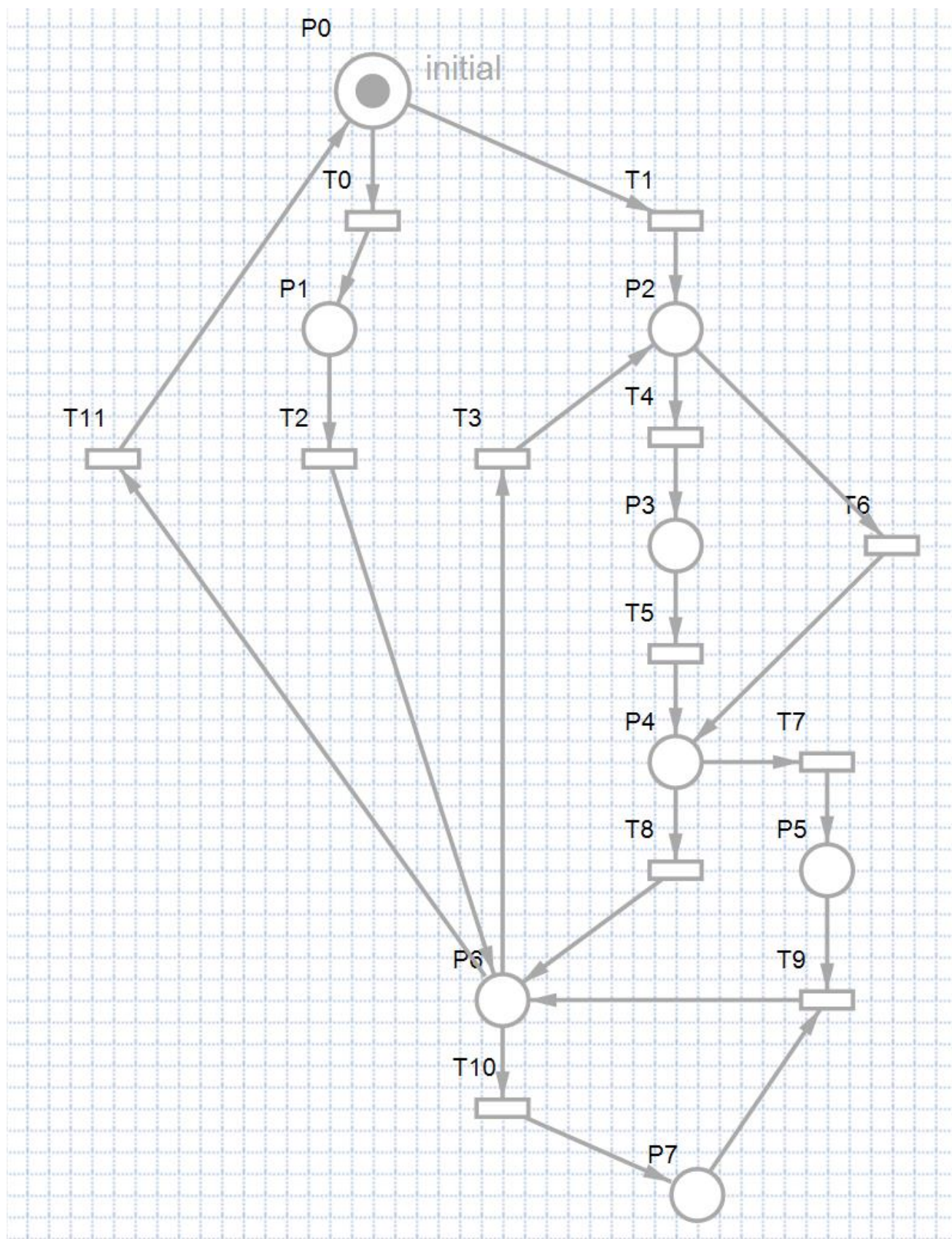


Рисунок 1 – Мережа Петрі за даними розділу 6, розроблена в програмі HPetriSim

- експериментальну верифікацію на стенді з ідентифікацією параметрів (пороги, таймінги, закони перемикання швидкостей);
- інтеграцію з PLC/SCADA: мапування переходів/місць на задачі, події та блоки IEC 61131-3, HIL-/SIL-тестування, напівавтоматичну генерацію логіки;
- створення бібліотеки типових фрагментів PN і протоколів випробувань для подальшої реплікації та підтримки цифрового двійника стенду.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Гавва О. М., Ялович С. М., Синтез системи точного дозування рідких продуктів на основі електропневматичних комплексів // *Технології харчової промисловості*, 2021. № 3. С. 45–52., DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247187>.
2. Cassandras C. G., Lafortune S., Introduction to Discrete Event Systems. 3rd ed. Cham: Springer, 2021. с. 1–52. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72274-6>.
3. Курдюмов Д.С., Кунченко Т.Ю., Огляд наявних та перспективних методів та алгоритмів дозування рідин за вагою // *Енергетика, електроніка та електромеханіка*, 2025. №6. С. 12–22, DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.06.02>.
4. Fajardo S., Kleijn J., Takes F. W., Langejans G. H. J. Modelling and measuring complexity of traditional and ancient technologies using Petri nets // *PLOS ONE*, 2022. Vol. 17, No 11, e0278310. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278310>.
5. Fernandes Costa T., Sobrinho Á., Chaves e Silva L., da Silva L. D., Perkusich A. Coloured Petri Nets-Based Modeling and Validation of Insulin Infusion Pump Systems // *Applied Sciences*, 2022. Vol. 12, No 3, Article 1475. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031475>.
6. Капустянов Ю.І., Собчук В.В. Теорія динамічних систем: навчальний посібник. КНУ, 2023.
7. Kounev S., Spinner S., Huber N., Brosig F. Introduction to Performance Modeling and Engineering of Distributed Systems Using Petri Nets // *ACM Computing Surveys*, 2020. Vol. 53(4). Article 74. DOI: <https://doi.org/10.1145/3397995>.
8. Barad M. Petri Nets-A Versatile Modeling Structure. *Applied Mathematics*, 2016. №7(9). P. 829–839. DOI: <https://doi.org/10.4236/am.2016.79074>.
9. Davidrajuh R., Skolud B., Krenczyk D. Performance Evaluation of Discrete Event Systems with GPenSIM. *Computers*, 2018. № 7(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/computers7010008>.
10. Li Y. Fault diagnosis of PLC-based discrete event systems using Petri net models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2022. №236(2). P. 143–155. DOI: <https://doi.org/10.1177/09596518221117098>.
11. Garcia-Vargas I., Senhadji-Navarro R. A New Approach for Implementing Finite State Machines with Input Multiplexing. *Electronics*, 2023. T. 12. № 18 Apr. 3763. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12183763>.
12. Rosiak K., Schlie A., Linsbauer L., Vogel-Heuser B., Schaefer I. Custom-tailored clone detection for IEC 61131-3 programming languages. *Journal of Systems and Software*, 2021. T. 182. Apr. 111070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111070>.
13. André É., Liu S., Liu Y., Choppy C., Sun J., Dong J. S. Formalizing UML State Machines for Automated Verification – A Survey. *ACM Computing Surveys*, 2023. T. 55, № 13s. DOI: <https://doi.org/10.1145/3579821>.

14. Zanker M., Bureš V., Tučník P. Environment, Business, and Health Care Preval: A Comprehensive, Systematic Review of System Dynamics Application Domains. *Systems*. 2021. Т. 9, № 2. Арт. 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems9020028>.
15. Foguelman D., Henning P., Uhrmacher A. M., de Castro R. D. EB-DEVS: A formal framework for modeling and simulation of emergent behavior in dynamic complex systems. *Journal of Computational Science*, 2021. Т. 53. Арт. 101387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101387>.
16. Fernandes J., Reis J., Melão N., Teixeira L., Amorim M. The Role of Industry 4.0 and BPMN in the Arise of Condition-Based and Predictive Maintenance: A Case Study in the Automotive Industry. *Applied Sciences*, 2021. Т. 11. № 8. Арт. 3438. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11083438>.
17. Grobelna I., Karatkevich A. Challenges in Application of Petri Nets in Manufacturing Systems. *Electronics*, 2021 № 10(18):2305. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10182305>.
18. HPetriSim: A graphical editor and simulator for Petri Nets. GitHub. URL: <https://github.com/Uzuul23/HPetriSim> (дата звернення: 11.08.2025).
19. Lladó C. M., et al. PIPE 2.7 overview: A Petri net tool for performance modeling and evaluation. *Proceedings of ICPE '22*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1145/3543146.3543163>.

REFERENCES:

1. Havva O. M., Yalovych S. M. (2021). Synthesis of a precise liquid product dosing system based on electro-pneumatic complexes. *Food Industry Technologies*, 2021. № 3. С. 45–52., DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247187>.
2. Cassandras C. G., Lafortune S., Introduction to Discrete Event Systems. 3rd ed. Cham: Springer, 2021. с. 1–52. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72274-6>.
3. Kurdiumov D. S., Kunchenko T. Yu. (2025). Review of existing and prospective methods and algorithms for liquid dosing by weight. *Power Engineering, Electronics and Electromechanics*, 2025. №6. С. 12–22, DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.06.02>.
4. Fajardo S., Kleijn J., Takes F. W., Langejans G. H. J. Modelling and measuring complexity of traditional and ancient technologies using Petri nets // *PLOS ONE*, 2022. Vol. 17, No 11, e0278310. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278310>.
5. Fernandes Costa T., Sobrinho Á., Chaves e Silva L., da Silva L. D., Perkusich A. Coloured Petri Nets-Based Modeling and Validation of Insulin Infusion Pump Systems // *Applied Sciences*, 2022. Vol. 12, No 3, Article 1475. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031475>.
6. Kapustianov Yu. I., Sobchuk V. V. *Theory of Dynamic Systems: Textbook*, 2023. Kyiv: KNU.
7. Kounev S., Spinner S., Huber N., Brosig F. Introduction to Performance Modeling and Engineering of Distributed Systems Using Petri Nets // *ACM Computing Surveys*, 2020. Vol. 53(4). Article 74. DOI: <https://doi.org/10.1145/3397995>.
8. Barad, M. Petri Nets-A Versatile Modeling Structure. *Applied Mathematics*, 2016. №7(9). P. 829–839. DOI: <https://doi.org/10.4236/am.2016.79074>
9. Davidrajuh R., Skolud, B., Krenczyk D. Performance Evaluation of Discrete Event Systems with GPenSIM. *Computers*, 2018. №7(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/computers7010008>
10. Li Y. Fault diagnosis of PLC-based discrete event systems using Petri net models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2022. №236(2). P. 143–155. DOI: <https://doi.org/10.1177/09596518221117098>.
11. Garcia-Vargas I., Senhadji-Navarro R. A New Approach for Implementing Finite State Machines with Input Multiplexing. *Electronics*, 2023. Т. 12. № 18. Арт. 3763. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12183763>.

12. Rosiak K., Schlie A., Linsbauer L., Vogel-Heuser B., Schaefer I. Custom-tailored clone detection for IEC 61131-3 programming languages. *Journal of Systems and Software*, 2021. Т. 182 Арт. 111070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111070>.
13. André É., Liu S., Liu Y., Choppy C., Sun J., Dong J. S. Formalizing UML State Machines for Automated Verification – A Survey. *ACM Computing Surveys*, 2023. Т. 55, № 13. DOI: <https://doi.org/10.1145/3579821>.
14. Zanker M., Bureš V., Tučník P. Environment, Business, and Health Care Prevail: A Comprehensive, Systematic Review of System Dynamics Application Domains. *Systems*, 2021. Т. 9, № 2. Арт. 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems9020028>.
15. Foguelman D., Henning P., Uhrmacher A. M., de Castro R. D. EB-DEVS: A formal framework for modeling and simulation of emergent behavior in dynamic complex systems. *Journal of Computational Science*, 2021. Т. 53. Арт. 101387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101387>.
16. Fernandes J., Reis J., Melão N., Teixeira L., Amorim M. The Role of Industry 4.0 and BPMN in the Arise of Condition-Based and Predictive Maintenance: A Case Study in the Automotive Industry. *Applied Sciences*, 2021. Т. 11. № 8. Арт. 3438. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11083438>.
17. Grobelna I., Karatkevich A. Challenges in Application of Petri Nets in Manufacturing Systems. *Electronics*, 2021. № 10(18):2305. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10182305>.
18. HPetriSim: A graphical editor and simulator for Petri Nets. GitHub. URL: <https://github.com/Uzuul23/HPetriSim> (дата звернення: 11.08.2025).
19. Lladó C. M., et al. PIPE 2.7 overview: A Petri net tool for performance modeling and evaluation. *Proceedings of ICPE '22*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1145/3543146.3543163>.

Стаття надійшла до редакції: 02.06.2025; рецензування: 20.06.2025; прийнята до публікації 02.07.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.
The article was submitted on 02.06.2025; revised on 20.06.2025; and accepted for publication on 02.07.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.