

**Ф. Д. Матіко, д-р техн. наук, проф.; В. В. Шалева**

## **РОЗРОБЛЕННЯ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ДОЗУВАННЯ ІНФУЗІЙНИХ РОЗЧИНІВ**

*В статті представлено результати удосконалення алгоритму дозування інфузійних розчинів для технологічної лінії WDM 8002 та результати розроблення нового алгоритму дозування. Проаналізовано процес дозування розчинів в лінії WDM 8002 та виявлено недоліки наявного алгоритму, що збільшують час наповнення тари та негативно впливають на точність дозування. Авторами удосконалено цей алгоритм шляхом впровадження додаткового етапу наповнення – напівточного дозування. Удосконалений алгоритм впроваджено в програму контролера та виконано експериментальні дослідження системи керування з цим алгоритмом на розробленій авторами експериментальній установці. За результатами досліджень встановлено, що впровадження удосконаленого алгоритму забезпечує зменшення часу наповнення флакону об'ємом 250 мл на 0,406 с при одночасному забезпеченні вимог до точності дозування. Розроблено алгоритм адаптивного налаштування параметрів процесу дозування на основі результатів попередніх циклів дозування. Виокремлено параметри процесу дозування для їх уточнення під час процедури адаптації.*

*Враховуючи окремі недоліки удосконаленого алгоритму авторами розроблено новий алгоритм дозування. В основу цього алгоритму покладено залежність між ступенем відкриття перетискного клапана та вагою дозованого розчину, розроблену на основі закону Гауса. Алгоритм впроваджено в програму контролера та виконано експериментальні дослідження системи керування з цим алгоритмом. За результатами експериментальних досліджень та опрацювання перехідних процесів в системі керування встановлено, що впровадження нового алгоритму дозування дає можливість зменшити час наповнення флакона 250 мл на 1,167 с. Зменшення часу наповнення флаконів дає можливість збільшити продуктивності лінії дозування розчинів WDM 8002 на таку величину: при застосуванні удосконаленого алгоритму – 187,3 флаконів за годину або 7,26 %; при застосуванні нового алгоритму дозування – 300,9 флаконів за годину або 11,66 %. Отримані дані підтверджують ефективність розроблених авторами алгоритмів.*

**Ключові слова:** технологічний процес, дозування розчинів, система керування, мікропроцесорний контролер, адаптивний алгоритм.

### **Вступ**

Відмови та зупинки у виробничих системах, виникають як в результаті дефектів технологічних апаратів, так і через несправність пристроїв, які є компонентами системи автоматизації процесу. Одним із найпоширеніших джерел збоїв в автоматизації виробництва є відмови давачів, перетворювачів та керуючих пристроїв [1]. В системах автоматичного керування, які призначені для дозування матеріалів або ж готових продуктів, однією з умов безвідмовної роботи системи є перевірений та надійний алгоритм керування на основі обраного методу дозування. Основними вимогами до алгоритму є стійкість до навколишніх збурень, невідомна реакція системи та контролера на нештатну ситуацію а також чітке дотримання послідовності запрограмованих кроків. В застосованому алгоритмі повинні бути відсутні неоднозначні умови які б призвели до виходу системи із стану рівноваги, що призвело б до неконтрольованих похибок дозування.

Потрібно підкреслити, що від алгоритму керування виконавчими механізмами залежить точність та тривалість дозування, а отже й продуктивність лінії дозування. Для зменшення часу дозування, підвищення продуктивності лінії дозування при дотриманні заданої точності, необхідно удосконалити алгоритм дозування та провести дослідження цього алгоритму. Зокрема, авторами досліджується лінія дозування інфузійних розчинів типу WDM 8002, для якої сформовано такі критерії її роботи: відтворюваність результатів дозування, точність дозування в межах +2 грам и від завдання та найменший час дозування. У цій статті авторами представлено результати досліджень алгоритмів дозування,

розроблених авторами під час удосконалення системи керування лінією дозування інфузійних розчинів типу WDM 8002.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [2] розглянуто проблеми дозування високов'язких розчинів у шприци та флакони. Автори зазначають, що тестування рішень на масовій фасувальній машині неефективне через виробничі обмеження, тому зосередилися на маломасштабній лінії. Вони визначили оптимальні параметри, мінімізували потенційні проблеми та дослідили перенесення рішень із дрібносерійних на великосерійні машини. Вплив параметрів оцінювали за допомогою фізичної моделі або великомасштабної машини.

У роботі [3] розглянуто розвиток виробництва стерильних ліків, зокрема впровадження закритого обладнання. Один із варіантів – системи RABS, які дешевші за ізолятори, але дорожчі в експлуатації. Вони зручні для модернізації, оскільки дозволяють поступове впровадження й використання наявної інфраструктури. Також зростає використання робототехніки, яка ефективніша за традиційну автоматизацію, особливо для закритих систем і обробки компонентів. Хоча автоматизація краща для швидких процесів (>300 флаконів/хв), робототехніка забезпечує гнучкість і знижує кількість відмов, що важливо для дорогих препаратів.

У публікації [4] розглянуто покращення якості виробництва стерильних рідин. Виконано порівняння сучасних та традиційних асептичних технологій наповнення й запаювання ампул. Розглянуто новітні методи, які використовують стерильну пластмасу замість скла, зокрема технологію Blow-Fill-Seal (BFS), яка формує ємність перед дозуванням і мінімізує контакт із людиною, підвищуючи стерильність.

Виробництво інфузійних розчинів належить до фармацевтичної галузі. Це розчини, які призначені для парентерального застосування. Вони можуть мати дуже різні фізико-механічні властивості: різну в'язкість, питому вагу, різну здатність піноутворення, можуть кристалізуватись та окислюватись [5]. Основні вимоги під час їхнього виробництва – це збереження високої стерильності та точне дозування їхньої кількості у флакон. Остання вимога зумовлена тим, що під час застосування до інфузійних розчинів додають ще інші медичні препарати.

За видом робочого циклу дозування може бути безперервним або порційним, а за принципом дії – об'ємним або ваговим [6]. При безперервному дозуванні потік продукту який виходить із дозатора, безперервно зважується і в залежності від результатів зважування продуктивність дозатора постійно коректується. Обладнання дозування фармацевтичної продукції включає об'ємні і вагові дозатори спеціально призначені для вимірювання кількості речовини, яка подається в окрему споживчу тару [6]. Зокрема, дозатори, які реалізують зважування в процесі дозування і фіксацію ваги розчину після завершення цього процесу, є найбільш поширеними і точними засобами дозування інфузійних розчинів. Із застосуванням цього методу дозування побудовано ряд технологічних ліній і, зокрема, лінія WDM 8002. Ця технологічна лінія має добре розроблену механічну частину і її часто модернізують з метою удосконалення системи керування на основі сучасного обладнання.

Отже, за результатами аналізу літературних джерел встановлено, що одним із найбільш поширених і точних методів дозування інфузійних розчинів є зважування тари під час її наповнення. Однак досягнення високої продуктивності технологічних ліній, побудованих на основі цього методу, можливе за умови застосування ефективного алгоритму керування процесом наповнення.

### Мета і завдання статті

**Метою статті** є дослідження первинного (діючого) алгоритму дозування, застосованого в технологічній лінії дозування інфузійних розчинів WDM 8002, виявлення недоліків цього алгоритму та розроблення нового алгоритму керування станцією дозування інфузійних

розчинів. Завданням цієї роботи є розроблення алгоритму керування який забезпечує:

- адаптацію параметрів алгоритму керування процесом наповнення для різних видів тари та розчинів з різними властивостями (густина, в'язкість);
- зменшення часу наповнення тари при забезпеченні заданої точності дозування;
- збільшення продуктивності лінії дозування на величину не менше 7 %.

Авторами також поставлено за мету виконати експериментальну перевірку цього алгоритму на розробленому стенді [8].

### Основна частина

Удосконалення наявного алгоритму дозування інфузійних лікарських засобів та розроблення алгоритму адаптивного пошуку оптимальних параметрів дозування.

За результатами аналізу процесу наповнення флаконів в діючій лінії дозування WDM 8002 цей процес розділено на три етапи (рис. 2): переддозування, швидке дозування, точне дозування. Особливістю першого етапу є те, що при відкритті регулюючого органу струмінь інфузійного розчину вдаряється в дно флакона і створює динамічне збурення для каналу зважування. Тому для цієї стадії дозування потрібно встановити невеликий ступінь відкриття регулюючого органу для зменшення динамічного тиску на вагову комірку. Також необхідно обмежити швидкість відкриття регулюючого органу, яка для різних значень об'єму тари і для розчинів з різною в'язкістю має бути різною.

Під час другого етапу дозування наявний стовп розчину в флаконі гальмує струмінь, який витікає з дозуючої голки. Зусилля від динамічного напору струменя, яке діє на вагову комірку є постійним. Воно залежить від витрати інфузійного розчину, яка визначається ступенем відкриття регулюючого органу, в'язкістю інфузійного розчину, тиском інфузійного розчину перед регулюючим органом та конструктивними розмірами дозуючої голки. Це зусилля можна виміряти на експериментальній установці і його слід враховувати перед переходом до третьої стадії дозування.

Третій етап дозування завершальний і найбільш важливий, бо під час цього етапу має бути сформоване точне значення ваги інфузійного розчину в флаконі. Протягом цієї стадії дозування регулюючий орган закривають за допомогою серії керуючих імпульсів, що діють на драйвер крокового двигуна. Необхідно закрити регулюючий орган з невеликим випередженням перед досягненням кінцевого значення ваги [8].

Розглянемо графіки зміни ваги та ступеня відкриття перетискного клапана у часі при дозуванні розчину у флакон об'ємом 250 мл, що отримані на діючій технологічній лінії WDM 8002 та представлені на рис. 1. Завдання для алгоритму дозування становить 201 г., тиск розчину на вході у перетискний клапан рівний 1,2 – 1,1 бар, час дозування становив 6,658 секунди, фактична вага розчину в флаконі 202,5 грам.

Методика виконання експерименту та отримання графіків перехідних процесів, представлених на рис. 2, є такою:

1) Здійснюють позиціонування всіх приводів лінії WDM 8002 та встановлення всіх вузлів у початкове положення; стартують процес наповнення флаконів.

2) Транспортують флакони за допомогою транспортувальних шнеків до станцій зважування, де здійснюється зважування пустого флакона та фіксується його наявність на відповідній станції.

3) Активують діючий алгоритм наповнення у керуючому контролері S7-1515, який змінює ступінь відкриття перетискного клапана станції наповнення реалізуючи три етапи дозування (переддозування, швидке дозування, точне дозування) та заповнює флакони розчином до заданої ваги.

4) Під час процесу наповнення формують архіви значень ваги розчину та ступеня відкриття перетискного клапана в пам'яті НМІ панелі TP1500, на основі яких будують графіки перехідних процесів наповнення флакона.

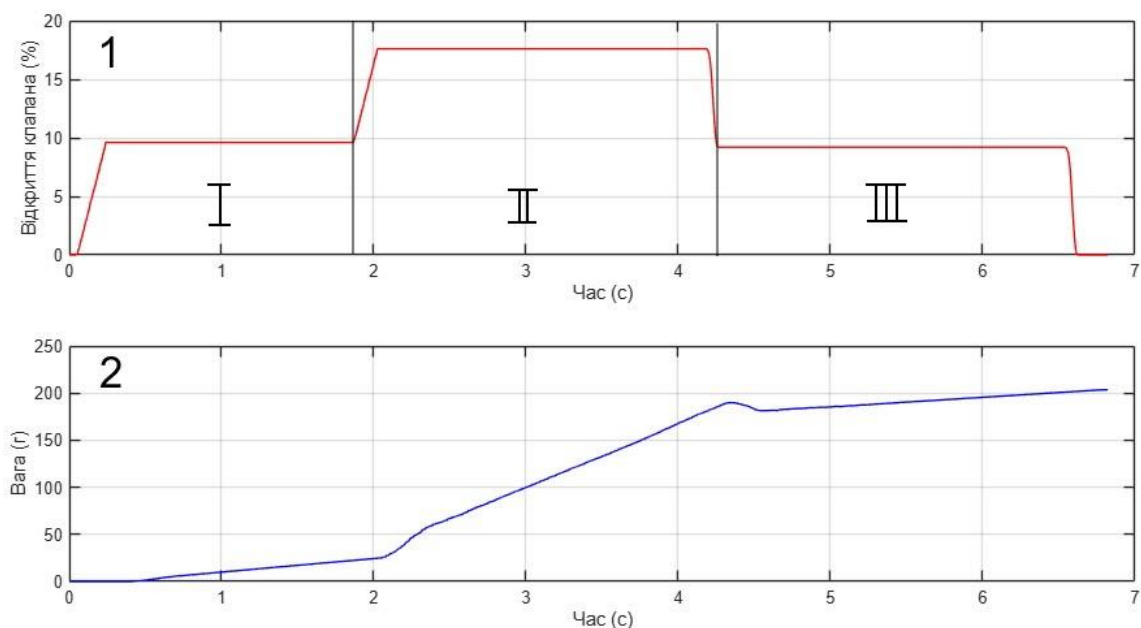


Рис. 1. Графіки перехідного процесу під час дозування розчину в флакон:  
1 – графік зміни ступеня відкриття перетискного клапана, 2 – графік зміни ваги розчину

На графіку зміни ступеня відкриття перетискного клапана станції дозування (крива 1 на рис. 1) бачимо характерний трапецієподібний вигляд зміни ступеня відкриття станції, що відповідає алгоритму з трьома етапами дозування. Крива 2 на рис. 1 відтворює зміну ваги розчину в часі. Бачимо що в точці переходу від етапу II до етапу III (точка переходу між швидким дозуванням та точним дозуванням) наявний максимум кривої та наступне зменшення ваги. Це спричинено зменшенням динамічного напору струменя, що діє на розчин та на дно флакона при зменшенні витрати розчину. Також потрібно відзначити, що ордината точки екстремуму ваги наближається до заданого значення ваги в системі керування – 201 г., тому при збільшенні ступеня відкриття перетискного клапана, а, відповідно, збільшення ординати екстремуму, алгоритм керування може розпізнати умову досягнення заданого значення ваги та завершити дозування. Таке спрацювання алгоритму призвело б до значного недоливу розчину. Тому авторами розроблено модифікацію діючого алгоритму, яка усуває вказаний вище недолік при переході від етапу II до етапу III.

Для вирішення описаної вище проблеми було реалізовано плавний перехід до стадії точного дозування. Зокрема, введено в алгоритм дозування етап так званого «напівточного» дозування. На рис. 2 схематично показано графік зміни ступеня відкриття клапана із введеним етапом напівточного дозування. Особливістю етапу III є те що в алгоритм дозування вводять параметр «вага напівточного дозування», який вказує на точку переходу до етапу III (етапу напівточного дозування).

Удосконалений алгоритм реалізовано в програмі контролера експериментальної установки [8] та виконано серію експериментів для тестування цього алгоритму. Експериментальна установка, розроблена авторами та представлена у [8], відтворює систему керування процесом наповнення одного флакона. Тому методика виконання експериментальних досліджень цього алгоритму подібна до методики, що викладена вище для дослідження процесу наповнення флаконів в технологічній лінії WDM 8002, і передбачає виконання таких операцій:

- 1) Позиціонування приводу перетискного клапана експериментальної установки та встановлення всіх вузлів у початкове положення.
- 2) Зважування пустого флакона та фіксування його ваги а, відповідно, і його наявності на станції зважування.

3) Старт алгоритму наповнення у контролері S7-1215C, який формує керуючий сигнал для крокового двигуна, змінює ступінь відкриття перетискного клапана станції наповнення та заповнює флакон розчином до заданої ваги.

4) Реєстрація значень ваги розчину та ступеня відкриття перетискного клапана під час процесу наповнення в пам'яті інженерної станції; побудова графіків перехідних процесів на основі архівів, отриманих з інженерної станції.



Рис. 2. Графік зміни ступеня відкриття перетискного клапана під час наповнення флакона: I – етап передозування, II – швидке дозування, III – напівточне дозування, IV – точне дозування.

За цією методикою, виконано наповнення флакона об'ємом 250 мл інфузійним розчином. Задане значення маси розчину становить 201 г., тиск розчину на вході у перетискний клапан рівний 1,2 – 1,1 бар. На рис. 3 наведено графіки зміни ваги розчину та ступеня відкриття перетискного клапана під час наповнення флакона. Час наповнення флакона склав 5,81 с., фактична вага розчину у флаконі після завершення процесу наповнення – 201,8 г.

З графіка зміни ступеня відкриття перетискного клапана (крива 1 на рис. 3) видно, що реалізовано 4 етапи дозування. Також змінився характер зміни ваги (крива 2 на рис. 3), зокрема зменшено зміну динамічного напору при переході від етапу II до III і, таким чином, усунуто різке зменшення ваги флакона. Також при використанні нового алгоритму вдалося збільшити ступінь відкриття перетискного клапана під час етапу II не втративши точності дозування та скоротивши час дозування із 6,658 сек. до 5,810 сек.

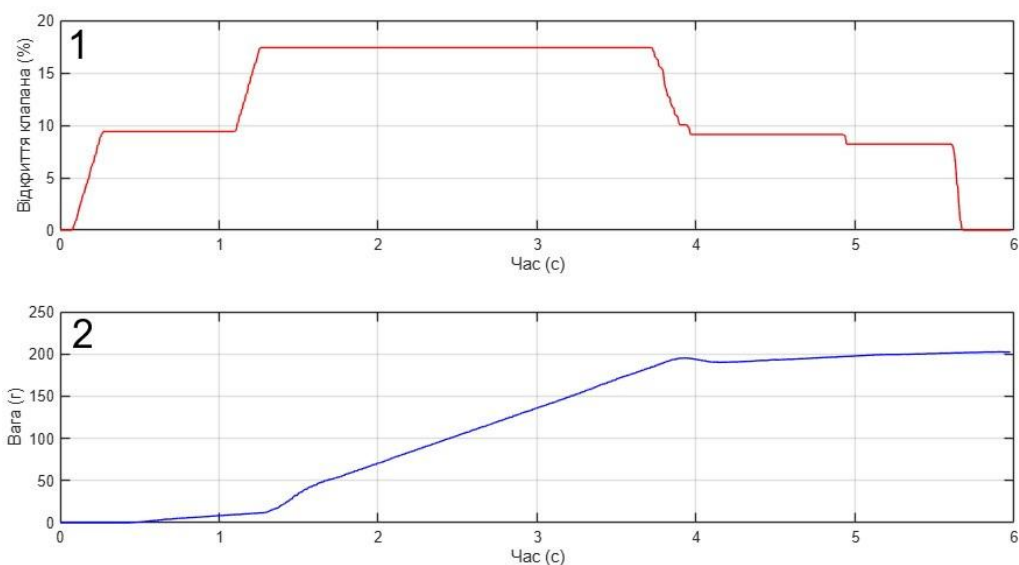


Рис. 3. Графіки перехідного процесу під час дозування розчину в флакон за удосконаленим алгоритмом: 1 – графік зміни ступеня відкриття перетискного клапана, 2 – графік зміни ваги розчину

Авторами розроблено алгоритм розрахунку початкових значень параметрів етапу напівточного дозування, який є основною складовою удосконаленого алгоритму (рис. 4). На

початковому етапі проводиться перевірка умови переходу на крок виконання цього алгоритму, а саме встановлення значення  $b$  у змінній Step, яка відображає кроки алгоритму дозування.

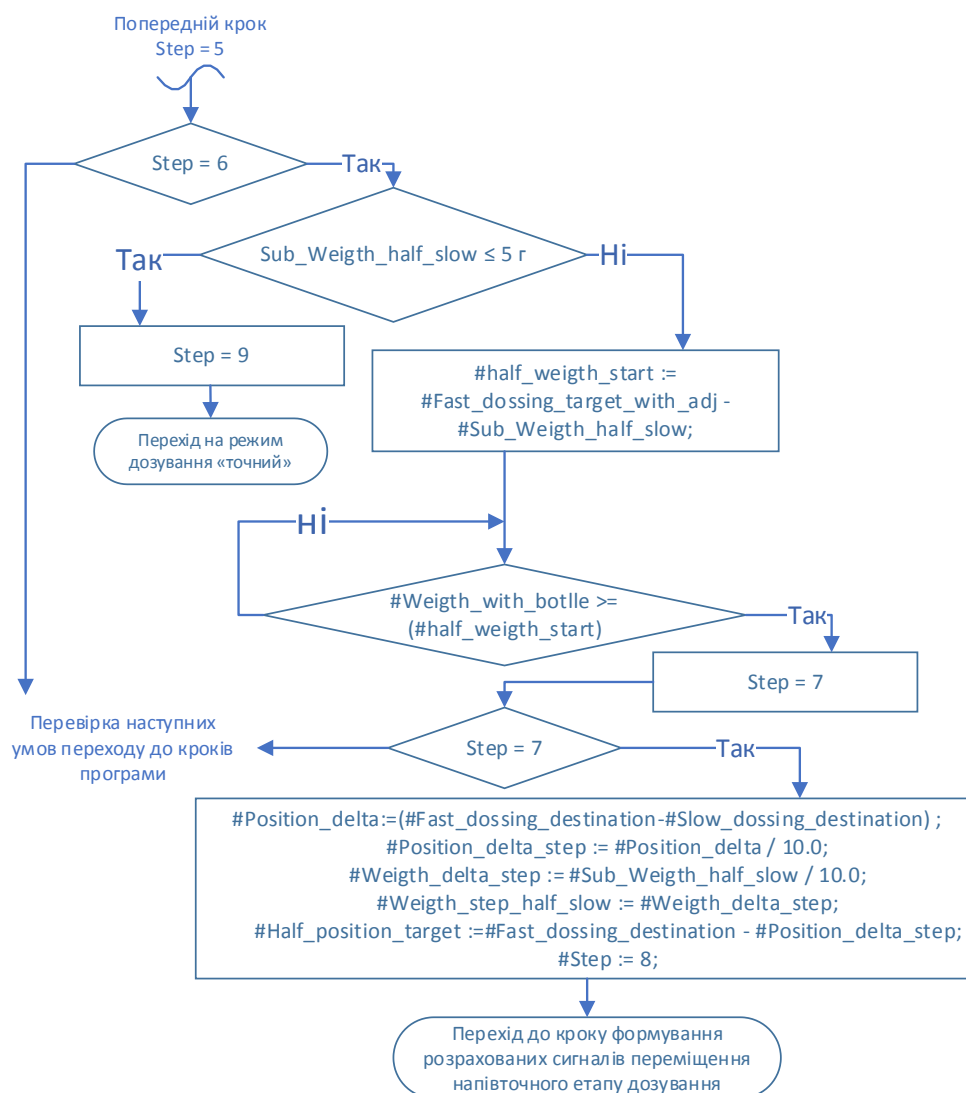


Рис. 4. Блок-схема алгоритму розрахунку початкових значень параметрів етапу напівточного дозування (рівновіддалених точок зміщення ваги та ступеня відкриття перетискного клапана)

Наступним кроком є перевірка встановленого параметра напівточного дозування на панелі керування: якщо значення ваги встановлене менше рівне 5 грам, алгоритм автоматично пропустить етап напівточного дозування, адже різниця ваги для розрахунку точки переходу є незначною та крок руху перетискного клапана є надто малий. В інших випадках відбувається наступний крок алгоритму, а саме розрахунок точки переходу (початку напівточного дозування)  $half\_weigth\_half\_start$ , для алгоритму за формулою:

$$half\_weigth\_half\_start = Fast\_dossing\_target\_with\_adj - Sub\_Weigth\_half\_slow,$$

де  $Fast\_dossing\_target\_with\_adj$  – вага завершення швидкого дозування,  $Sub\_Weigth\_half\_slow$  – вага напівточного дозування.

Після розрахунку значення ваги для точки переходу на напівточне дозування відбувається контроль поточної ваги флакону відносно знайденої ваги переходу, якщо ж поточна вага флакону буде більше рівна ваги переходу відбудеться розрахунок параметрів кроку перетискного клапана. Першим параметром для розрахунку є різниця позицій переміщення перетискного клапана –  $Position\_delta$ :

$$Position\_delta = Fast\_dossing\_destination - Slow\_dossing\_destination,$$

де  $Fast\_dossing\_destination$  – позиція швидкого дозування,  $Slow\_dossing\_destination$  – позиція точного дозування.

Далі відбувається розрахунок кроку переміщення перетискного клапана  $Position\_delta\_step$  для 10 кроків станції:

$$Position\_delta\_step = Position\_delta / 10,$$

а також розрахунок значень кроку ваги  $Weigth\_delta\_step$  для 10-ти кроків станції:

$$Weigth\_delta\_step = Sub\_Weigth\_half\_slow / 10.$$

Наступним кроком відбувається розрахунок першої позиції  $Half\_position\_target$  відповідно до знайдених параметрів кроку перетискного клапана:

$$Half\_position\_target = Fast\_dossing\_destination - Position\_delta\_step.$$

Завершальним кроком цього алгоритму є перехід до формування керуючих сигналів до драйвера крокового двигуна відповідно до обчислених кроків ваги та кроків двигуна.

Удосконалений алгоритм дозування інфузійних лікарських засобів при встановленні обчислених значень параметрів демонструє кращі показники дозування, однак для підвищення ефективності потребує уточнення параметрів налаштування саме під час процесу дозування. Процес визначення оптимальних параметрів може бути довготривалим у часі тому доцільно розробити адаптивний алгоритм уточнення параметрів кожного етапу дозування.

Виокремлено три параметри що суттєво впливають на точність дозування:

- ступінь відкриття перетискного клапана на етапі швидкого дозування;
- ступінь відкриття перетискного клапана під час етапу точного дозування;
- точка переходу до етапу точного дозування (значення ваги флакону для переходу).

Авторами розроблено алгоритм адаптивного визначення цих параметрів під час процесу дозування, блок-схема якого зображена на рис. 5.

Алгоритм адаптації параметрів дозування починає свою роботу з встановлення початкових параметрів, а саме встановлення змінних  $Done = False$ ,  $Error = False$ ,  $Error\_Status = 16\#8001$ . Надалі проводиться перевірка чи функція включена відповідно до статусу функціональної кнопки на оперативній панелі системи керування. Якщо функція вимкнута встановлюються нульові значення для корекції  $Open\_corection$  (ступінь відкриття перетискного клапана на етапі точного дозування) та корекції  $Weigth\_corection$  (точка переходу до етапу точного дозування (вага переходу)). При увімкненій функції алгоритм переходить на наступний крок де відбувається очікування тригера для проведення розрахунку корекцій параметрів дозування.

Розроблений адаптивний алгоритм легко впроваджується в удосконалений алгоритм дозування на основі чотирьох етапів дозування. Важливо зазначити, що алгоритм адаптації параметрів дозування приймає рішення щодо зміни параметрів на основі результатів попереднього проведеного дозування розчину у флакон.

На першому кроці розрахунку проводиться корекція ступеня (позиції) відкриття перетискного клапана на етапі точного дозування, алгоритм перевіряє виконання такої умови: чи вага розчину у флаконі є меншою за встановлену нижню попереджувальну межу ваги та чи справджується умова, що поточний час дозування не перевищує бажаний час дозування, встановлений з панелі керування. При виконанні цієї умови відбувається коректування ступеня відкриття перетискного клапана на етапі точного дозування та додавання до поточного значення ступеня відкриття 0,2 %.

На другому кроці алгоритм перевіряє виконання умови: чи вага розчину у флаконі є більшою за встановлену верхню попереджувальну межу, що встановлена з панелі керування. При виконанні цієї умови відбувається коректування ступеня відкриття перетискного клапана на етапі точного дозування та віднімання від поточного значення ступеня відкриття 0,2 %.

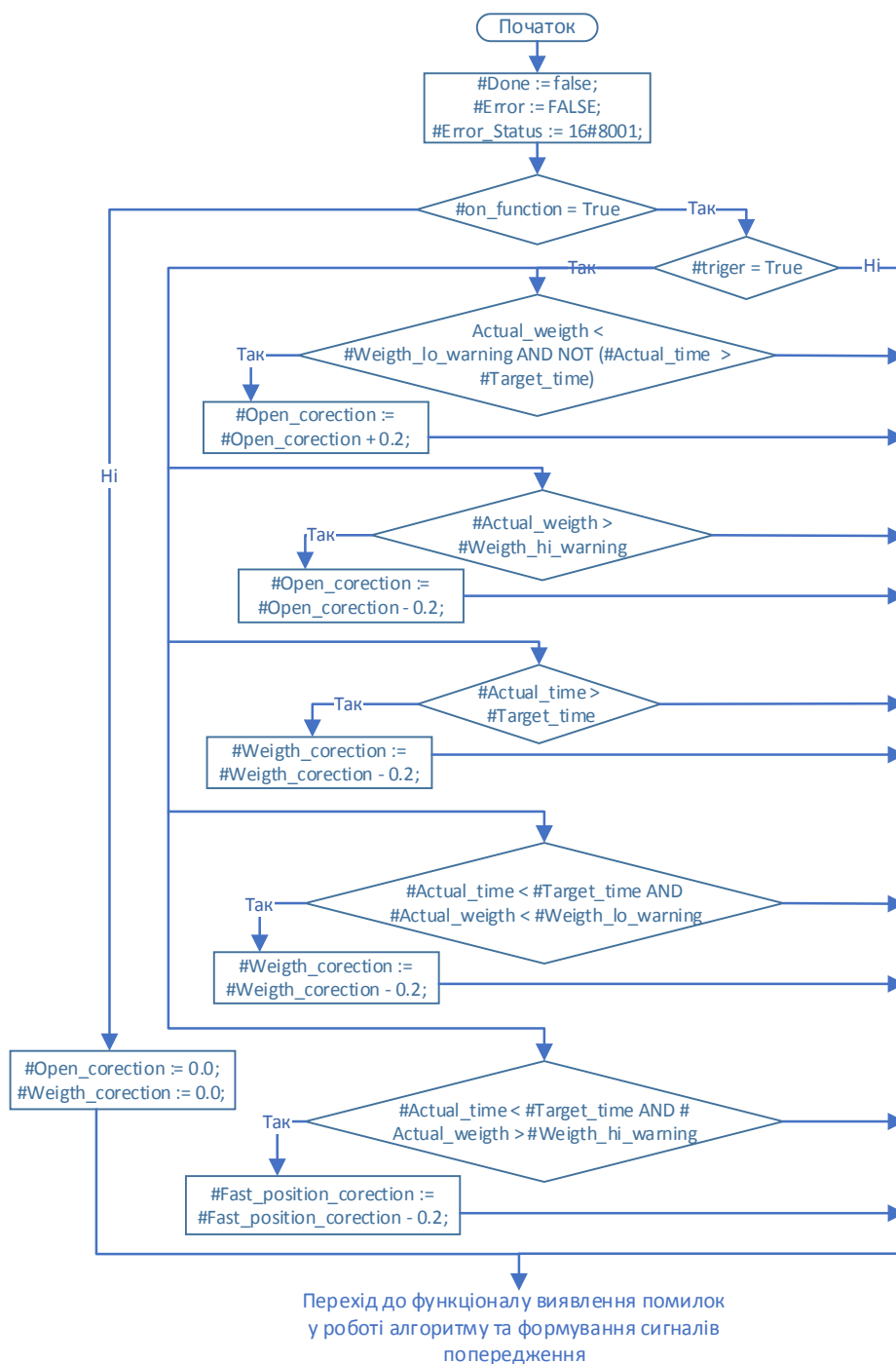


Рис. 5. Блок-схема алгоритму адаптації параметрів дозування інфузійних розчинів

На третьому кроці алгоритм проводить корекцію точки переходу на етап точного наповнення (граничного значення ваги розчину). Алгоритм проводить перевірку умови: чи час дозування флакону є більшим за бажаний час дозування. При виконанні цієї умови виконується коректування точки переходу на етап точного наповнення та збільшення значення точки переходу на 0,2 грам.

На четвертому кроці алгоритм перевіряє виконання умови: чи час дозування флакону є меншим за бажаний час дозування та чи вага розчину у флаконі є меншою за встановлену нижню попереджувальну межу ваги, що встановлена з панелі керування. При виконанні цієї умови алгоритм виконує коректування точки переходу на етап точного наповнення та віднімає від поточного значення ваги 0,2 грам.



На п'ятому кроці алгоритм виконує коректування ступеня відкриття перетискного клапана під час етапу швидкого дозування. Алгоритм виконує перевірку умови: чи час дозування флакону є меншим за бажаний час дозування та чи вага розчину у флаконі є більшою за встановлену верхню попереджувальну межу ваги. При виконанні цієї умови система приймає рішення про проведення коректування ступеня відкриття перетискного клапана на етапі швидкого дозування та віднімає від поточного значення позиції 0,2 %.

Після виконання цих 5-ти кроків відбувається перехід до алгоритму виявлення помилок у роботі функції коректування та формування сигналів попередження відповідно до меж встановлених на панелі керування.

### Розроблення нового алгоритму дозування інфузійних розчинів

Детально проаналізувавши графіки перехідних процесів дозування (Рис. 1 та 3) бачимо що алгоритми з поетапною зміною ступеня відкриття перетискного клапана мають низку недоліків. Зокрема, це обмеження на тривалість етапу швидкого дозування, обмеження максимального значення ступеня відкриття перетискного клапана внаслідок впливу динамічного напору струменя. Введення етапу напівточного дозування дало можливість дещо зменшити час наповнення флакона при цьому забезпечуючи вимоги до точності дозування. Однак розглядаючи можливості подальшого зменшення часу наповнення тари та усунення вказаних вище недоліків, авторами розроблено новий алгоритм дозування зі змінним ступенем відкриття перетискного клапана під час кожного з етапів.

Для можливості згладжування впливу струменя на вагову комірку варто використовувати алгоритм, що плавно змінює відкриття клапана до екстремуму та закриває його на фінальному етапі. За результатами аналізу набору функцій, що дають можливість реалізувати таку залежність, авторами вибрано функцію густини ймовірності розподілу, або закон Гауса. "Універсальність" нормального закону пояснюється тим, що будь-яка випадкова величина, представлена множиною з великої кількості окремих числових значень, кожне з яких підпорядковується різним законам розподілу, розподілена за нормальним законом [9], [10].

Функція нормального закону розподілу густини ймовірності має вигляд [9], [10]:

$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

де  $\mu$  – математичне сподівання,  $\sigma^2$  – дисперсія випадкової величини.

Вигляд функції нормального закону розподілу густини ймовірності в залежності від математичного сподівання та дисперсії випадкової величини представлено на рис. 6, графік 1 [11].

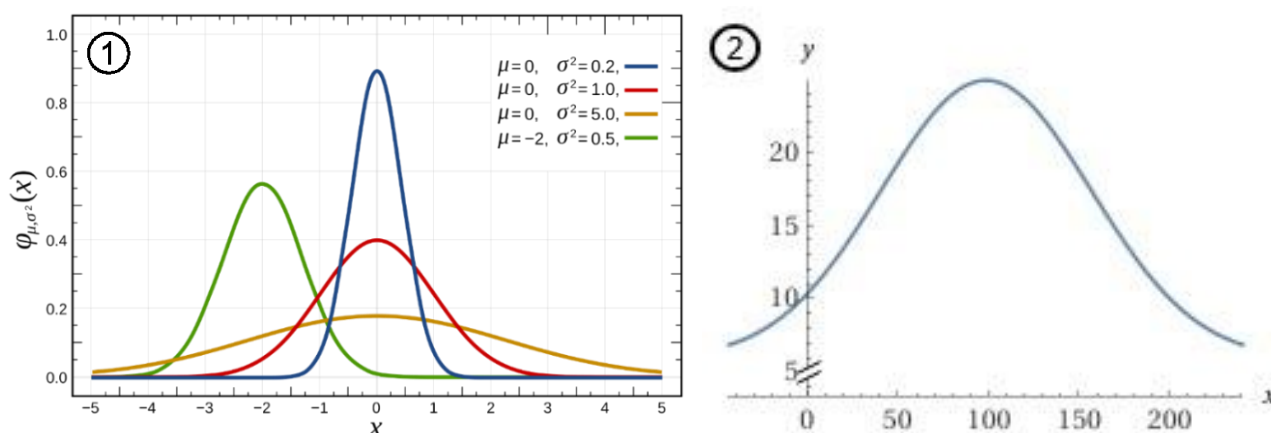


Рис. 6. Функція нормального закону розподілу густини ймовірності в залежності від величини математичного сподівання та дисперсії випадкової величини (графік 1); залежність ступеня відкриття перетискного клапана від ваги розчину у флаконі (графік 2)

Функцію нормального розподілу (1) вирішено використати як закон регулювання ступеня відкриття перетискного клапана. У якості аргументації функції (величина  $x$ ) розглянемо вагу що змінюватиметься під час наповнення тари. Математичне сподівання та стандартне відхилення у цьому законі регулювання прийматимуться як параметри налаштування функції. Також введемо у рівняння (1) додатковий коефіцієнт  $k$ , який буде масштабувати функцію та враховуватиме розмірність вихідної величини цього закону регулювання. Функцію  $f(x)$  розглядаємо як ступінь відкриття перетискного клапана у відсотках. Тоді залежність ступеня відкриття перетискного клапана від ваги розчину  $x$  має вигляд:

$$f(x) = k \left( \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right) \right). \quad (2)$$

Шляхом оптимізації за критерієм мінімуму часу наповнення флаконів отримано такі значення параметрів рівняння (2):  $k = 2750 \%$ ,  $\mu = 98$  г,  $\sigma = 58$  г. Графік функції зміни ступеня відкриття перетискного клапана при вказаних значеннях параметрів зображений на рис. 6 (графік 2).

На основі рівняння (2) розроблено алгоритм керування процесом дозування, який реалізовано в програмі контролера Siemens CPU 1215C, що є складовою розробленої авторами експериментальної установки [8]. На експериментальній установці виконано дослідження процесу дозування розчину за такою ж методикою, як і для удосконаленого алгоритму. За результатами експериментальних досліджень процесу дозування розчину із застосуванням алгоритму, розробленого на основі залежності (2), отримано графіки зміни ваги та ступеня відкриття перетискного клапана у часі при дозуванні розчину в флакон об'ємом 250 мл (рис. 7). Завдання для алгоритму дозування 201 г., тиск розчину на вході у перетискний клапан 1,2 – 1,1 бар, час дозування 4,767 секунди, фактична вага розчину 203,0 грам.

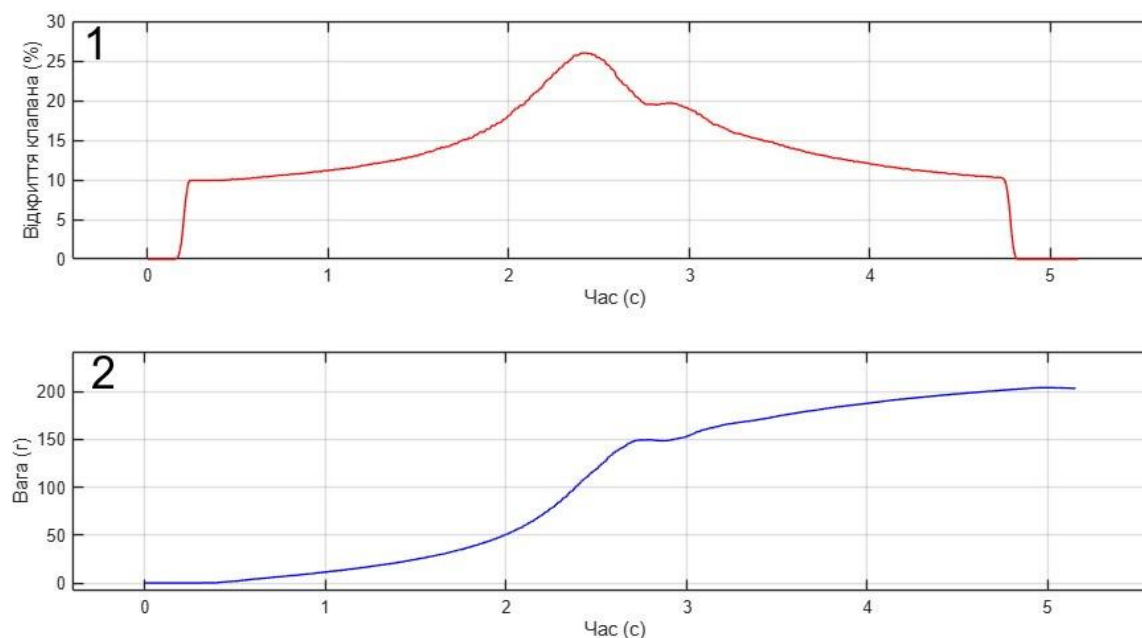


Рис. 7. Графіки зміни ваги інфузійного розчину в флаконі в процесі дозування:  
1 – графік зміни ваги розчину, 2 – графік зміни ступеня відкриття перетискного клапана

З графіка зміни ступеня відкриття перетискного клапана (крива 2 на рис. 7) бачимо, що застосування рівняння (2) та розроблення нового алгоритму дало можливість збільшити максимальне значення ступеня відкриття перетискного клапана. Також новий алгоритм повністю усуває різкі зміни ваги, наявні у попередніх алгоритмах при зміні етапу дозування (крива 1 на рис. 7):. Застосування нового алгоритму на основі залежності (2) дало можливість

зменшити час наповнення флакона з 6,658 секунд (первинний алгоритм) та 5,810 секунд (удосконалений алгоритм) до 4,767 секунд зберігши при цьому точність дозування.

Розроблений новий алгоритм має потенціал для удосконалення, а саме:

– можливо реалізувати оптимальний розрахунок параметрів функції (2), представлення графіку функції та значень параметрів на операторській панелі для оцінки та співставлення знайдених значень параметрів з результатами оцінювання характеристик процесу дозування;

– можливо реалізувати алгоритм адаптивного налагодження параметрів закону регулювання (2) для його застосування у реальному часі.

### Аналіз результатів експериментальних досліджень алгоритмів дозування

Для перевірки роботи алгоритмів дозування визначення їх ефективності, точності та швидкодії було виконано експериментальні дослідження усіх трьох на розробленій авторами лабораторній установці. Під час досліджень було проведено 10 послідовних дозувань із такими встановленими параметрами: завдання для алгоритмів дозування становить 201 г., тиск розчину на вході у перетискний клапан становив 1,2 – 1,1 бар, використовувались однакові флакони місткістю 250 мл. Отримані дані представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень трьох алгоритмів дозування (первинного, удосконаленого та нового)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Первинний алгоритм дозування із трьома етапами (перед дозування, швидке дозування, точне дозування)										
Вага, г	202,5	202,5	202,5	202,4	202,6	202,6	202,4	202,3	202,3	202,6
Час, с	6,11	6,15	6,21	6,24	6,19	6,08	6,23	6,20	6,22	6,06
Удосконалений алгоритм дозування із чотирма етапами (перед дозування, швидке дозування, напівточне дозування, точне дозування)										
Вага, г	202,0	202,0	202,1	202,1	202,0	202,1	202,0	202,0	202,1	202,2
Час, с	5,64	5,92	5,74	5,80	5,93	5,78	5,71	5,54	5,89	5,68
Новий алгоритм дозування на основі рівняння (2)										
Вага, г	202,2	202,2	202,3	202,2	202,1	202,2	202,2	202,3	202,2	202,2
Час, с	4,93	4,98	5,12	4,85	5,21	5,02	5,1	4,87	4,93	5,01

Проаналізувавши отримані значення ваги для кожного із застосованих алгоритмів дозування можна стверджувати, що кожен із алгоритмів має хорошу відтворюваність результату дозування проте із певною додатною статичною похибкою. Оцінившицю похибку для кожного із алгоритмів можна корегувати завдання дозування на панелі оператора для забезпечення вимоги щодо точності дозування 201 грам  $\pm 0,7$  грам. Також розкид значень ваги розчину знаходиться в межах технологічних вимог ( $\pm 0,1-0,2$  грам).

Середній час дозування для першого алгоритму становить 6,169 секунди, для другого алгоритму – 5,763, для третього алгоритму – 5,002. Модифікація базового алгоритму додаванням проміжного етапу (напівточного дозування) дозволила зменшити час дозування на 0,406 секунди, а впровадження нового алгоритму – на 1,167 секунди. Хоча абсолютні значення зменшення тривалості наповнення одного флакону можуть здатися невеликими, для масового виробництва це може призвести до значного підвищення продуктивності лінії дозування

Нами проведено розрахунок продуктивності лінії дозування WDM8002, що має 8 станцій дозування, при застосуванні трьох алгоритмів дозування. Час переміщення флаконів до станції дозування становить 4 секунди, час для зважування флакону та для прийняття рішення про дозований розчин – 1 секунда. Отож, час повного циклу наповнення флакона об'ємом 250 мл становить: для первинного алгоритму дозування – 11,169 с, для удосконаленого алгоритму – 10,763 с, для нового алгоритму – 10,002 с.

Для розрахунку продуктивності лінії дозування WDM8002 за 1 годину застосовано формулу:

$$A = \frac{3600}{t_n} \cdot K_c, \quad (3)$$

де  $A$  – продуктивність лінії за годину, шт.;  $t_n$  – час повного циклу наповнення флакона, с;  $K_c$  – кількість станцій наповнення в лінії дозування,  $K_c = 8$ .

Отримано такі значення продуктивності лінії: для первинного алгоритму дозування продуктивність становить 2578,5 флаконів за годину, для удосконаленого алгоритму – 2765,8 флаконів за годину; для нового алгоритму – 2879,4 флаконів за годину. Тож приріст продуктивності при застосуванні удосконаленого алгоритму становить 187,3 флакони (7,26 %), при застосуванні нового алгоритму дозування – 300,9 флаконів (11,66 %).

Отже, за результатами виконаних досліджень встановлено, що удосконалений алгоритм керування процесом дозування, а також розроблений новий алгоритм зменшують час наповнення тари при забезпеченні вимог до точності наповнення, що значно підвищують загальну продуктивність технологічних ліній дозування.

### Висновки

В системах автоматичного керування лініями дозування матеріалів або розчинів важливим є вибір методу дозування та застосування алгоритму керування процесом дозування, що забезпечить відтворюваність результатів дозування. Модернізація наявних методів дозування а також впровадження нових алгоритмів дозування є важливими етапами розвитку технологічних ліній дозування, які дозволяють підвищити їх продуктивність та точність.

Під час дослідження системи керування лінією дозування WDM8002 авторами отримано такі нові результати:

- удосконалено наявний алгоритм дозування розчинів, шляхом введення проміжного етапу напівточного дозування, що дало можливість зменшити час наповнення флакона; впроваджено функцію адаптивного налаштування параметрів удосконаленого алгоритму дозування, що забезпечує адаптацію алгоритму дозування при зміні об'єму тари та зміні властивостей інфузійного розчину;

- розроблено новий алгоритм дозування розчинів із застосуванням залежності ступеня відкриття перетискного клапана від ваги дозованого розчину у формі функції нормального закону розподілу, що забезпечує додаткове зменшення часу наповнення та значне підвищення продуктивності лінії дозування.

Обидва алгоритми впроваджено в програму контролера Siemens CPU 1215C та виконано їх апробацію на розробленій авторами експериментальній установці, яка повністю відтворює технологічний процес вагового дозування розчинів у технологічній лінії WDM 8002.

За результатами експериментальних досліджень виявлено додатну статичну похибку дозування, вплив якої пропонується усунути зміщенням заданого значення ваги розчину для кожного із алгоритмів. Визначено середній час дозування для кожного із алгоритмів дозування та проведено розрахунок продуктивності машини вагового наповнення при використанні різних алгоритмів дозування. Встановлено, що приріст продуктивності лінії WDM 8002 становить: при застосуванні удосконаленого алгоритму – 187,3 флаконів за годину або 7,26 %; при застосуванні нового алгоритму дозування – 300,9 флаконів за годину або 11,66 %. Отримані дані підтверджують ефективність розроблених авторами алгоритмів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Development of PLC-Based Software for Increasing the Dependability of Production Automation Systems / D. Schütz et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, №4. P. 2397–2406. URL: DOI:10.1109/TII.2012.2229285 (date of access: 28.01.2025).
  2. Small-Scale Syringe and Vial-Filling Capability for Development of Robust Filling Processes, Smooth Tech Transfers, and to Resolve Manufacturing Issues: Summary of Key Learnings / K. Hutter et al. *BioPharm International*. 2023. Vol. 36, №7. P. 28–33.
  3. Markarian J. Closed Systems for Aseptic Fill and Finish. *Pharmaceutical Technology*. 2019. Vol. 43, № 5. P. 36–39. URL: <https://www.pharmtech.com/view/closed-systems-aseptic-fill-and-finish>(date of access: 20.01.2025).
- Наукові праці ВНТУ, 2025, №1

4. Reed Ch. Improving Process Quality of Pharmaceutical Liquids – Aseptic Blow/Fill/Seal Technology vs. Traditional Aseptic Processing. *Weiler Engineering, Inc.* URL: <https://www.weilerengineering.com/images/downloads/WhitePapers/Weiler-Improving-process-quality.pdf> (date of access: 20.01.2025).
5. Виробництво інфузійних розчинів. Бібліотека BukLib.net. Головна. URL: <https://buklib.net/books/36223/> (date of access: 20.01.2025).
6. Технологічне обладнання біотехнологічної і фармацевтичної промисловості: підручник / Стасевич С. Т. та ін. Львів: Новий світ-2000, 2018. 410 с.
7. Dynamic Load Cell Technology // METTLER TOLEDO. URL: <https://www.mt.com/us/en/home/library/white-papers/product-inspection/dynamic-load-cell.html> (date of access: 22.01.2025).
8. Matiko F., Shaleva V. Development of Experimental Setup to Investigate the Control System for Infusion Solutions Dosing Process. *Energy Engineering and Control Systems*. 2024. Vol. 10, № 2. P. 131–141.
9. Тичинська Л. М., Черепашук А. А. Теорія ймовірностей. Ч. 1. Історичні екскурси та основні теоретичні відомості: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 112 с.
10. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч. посібник. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2007. 624 с.
11. Normal distribution. Article from Wikipedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Normal\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution) (date of access: 22.01.2025).

Стаття надійшла до редакції 25.02.2025.

Стаття пройшла рецензування 25.03.2025.

**Матіко Федір Дмитрович** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: [fedir.d.matiko@lpnu.ua](mailto:fedir.d.matiko@lpnu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-6569-2587>.

**Шалева Володимир Володимирович** – аспірант кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: [volodymyr.v.shaleva@lpnu.ua](mailto:volodymyr.v.shaleva@lpnu.ua), <https://orcid.org/0009-0003-8612-1064>.  
Національний університет «Львівська політехніка».