

RESEARCH OF COMMUNICATIVE DESIGN OF PRODUCTION SYSTEMS

O. Volodin, O. Gavva, S. Tokarchuk, O. Savchuk

National University of Food Technologies

Key words:

*Dosing accuracy
Dose formation
Mechatronic module
Dosing and filling
operation
Feedback*

Article history:

Received 09.11.2023
Received in revised form
23.11.2023
Accepted 08.12.2023

Corresponding author:

O. Volodin

E-mail:

sashavolodin11@gmail.com

Citation: O. С. Володін,
О. М. Гавва, С. В. Токар-
чук, О. С. Савчук (2023).
Дослідження комунікатив-
ного дизайну виробничих
систем. *Наукові праці
НУХТ*, 29(6), 45—52.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2023-29-6-5

ABSTRACT

Today, the method of developing a digital twin as a computer prototype for any real object is widely used. An entire industrial enterprise with its production lines, a specific product or a separate technological process can be objects under study. During the synthesis, visual representation of the prototype object can be gotten, and then proceed to the physical properties. The purpose of the study was to evaluate the communicative design of production systems for the liquid product packaging process using the example of a hybrid mechatronic dosing and packaging module. The research was conducted in two stages. At the first stage, a computer model of the mechatronic module was developed, which described the change in technological parameters of liquid dosing and the initial and boundary conditions of the process. The modes of operation of the hybrid mechatronic dosing and filling module were set by software using a driver. The boundary conditions of the process of forming and squeezing the product dose were taken into account. At the second stage, the computer model was tested using digital control and measuring equipment. During the tests, the accuracy of dose formation repetitions was determined to be within $\pm 0.22\%$ and 0.9% of the set dose weight of 50...200 ml. The results of the research showed that the accuracy of dose formation depends on the set parameters of the dosing process. In particular, the value of compressed air pressure in the batch receiver has the greatest impact on the accuracy. Based on the research results, the laws of the required compressed air pressure distribution were formed to meet the specified performance. The obtained research results will allow to improve the design of liquid product dosing modules and determine the input parameters for further studies.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУНІКАТИВНОГО ДИЗАЙНУ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

О. С. Володін, О. М. Гавва, С. В. Токарчук, О. С. Савчук

Національний університет харчових технологій

Сьогодні широко використовують методiku розроблення цифрового двійника як комп'ютерного прообразу для будь-якого реального об'єкта. За досліджуваній об'єкт можна обрати, наприклад, все промислове підприємство з його виробничими лініями, конкретний екземпляр виробу або окремих технологічний процес. Під час синтезу можна отримати візуальне уявлення об'єкта-прообразу, а потім вже переходити до фізичних властивостей.

Мета дослідження полягала в оцінці комунікативного дизайну виробничих систем процесу фасування рідких продуктів на прикладі гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля. Дослідження проводилися у два етапи. На першому етапі була розроблена комп'ютерна модель мехатронного модуля, яка описувала зміну технологічних параметрів дозування рідини і початкові та граничні умови процесу. Програмно встановлені режими роботи гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля за допомогою драйвера. Враховані граничні умови процесу формування і витиснення дози продукту. На другому етапі було проведено випробування комп'ютерної моделі з використанням цифрового контрольно-вимірювального обладнання. Під час випробувань визначена точність повторювань формування дози у межах $\pm 0,22\%$ та $0,9\%$ від встановленої величини маси дози 50...200 мл. Результати досліджень показали, що точність формування дози залежить від заданих параметрів процесу дозування. Зокрема, найбільший вплив на точність має величина тиску стисненого повітря в порційному ресивері. На основі отриманих результатів досліджень було сформульовано закони необхідного розподілення тиску стисненого повітря для дотримання заданої продуктивності. Отримані результати досліджень дають змогу удосконалити конструкції модулів дозування рідких продуктів і визначити вхідні параметри для проведення натурних досліджень.

Ключові слова: точність дозування, формування дози, мехатронний модуль, дозувально-фасувальна операція, зворотний зв'язок.

Постановка проблеми. Аналіз методів комунікативного дизайну виробничих систем показав, що актуальним завданням є дослідження системи безперервного відстежування основних робочих характеристик промислового об'єкта. Така система дасть змогу не тільки контролювати стан обладнання в режимі реального часу, але й розробляти шляхи підвищення його технологічної ефективності. Розроблений алгоритм побудови системи цифрового моніторингу передбачає використання таких компонентів: графічна цифрова 3D-модель об'єкта, розроблена із застосуванням CAD-систем інженерного проектування; технологія промислового «Інтернету речей» (IIoT) для отримання реальних даних від прообразу.

Доповненнями методів комунікативного аналізу є інтегровані математичні моделі, які забезпечують «поведінку» цифрового двійника відповідно до поведінки його прообразу й технології візуалізації для відображення даних про стан об'єкта.

На основі розробленого алгоритму було спроектовано експериментальну систему цифрового моніторингу дозувально-фасувального мехатронного модуля. Система включає в себе такі компоненти: електропневмопривід; блок керування, який реалізує повноцінний зворотний зв'язок для приводу; блок віддаленого керування Wi-Fi на основі передачі даних у хмарне сховище.

Існуючі дослідження показали наявність науково-практичної проблеми щодо доповнення виробничих систем блоками цифрового моніторингу з метою підвищення ефективності технологічних процесів. Сучасні автоматизовані дозувально-фасувальні системи є основою багатьох технологічних ліній. Однак у зв'язку з розвитком «Індустрії 4.0» і зростаючими вимогами до точності дозування, існуючі конструкції дозаторів вимагають попереднього моделювання. У дослідженні проведений якісний аналіз мехатронного дозувально-фасувального модуля пакувальної машини для рідких продуктів. На основі аналізу визначено, що актуальним є забезпечення таких параметрів модуля: діапазон доз від 0,01 до 20 л; витратні параметри від 1 до 1000 л/год. Ці параметри відповідають вимогам сучасних технологічних ліній і дають змогу забезпечити високу точність дозування рідких і малов'язких продуктів. Вирішення цього завдання є актуальним для синтезу нових пакувальних машин.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Універсалізація дозувально-фасувальних модулів пакувальних машин є актуальним завданням комунікативного дизайну. Це розширить функціональні можливості дозаторів з одночасним збереженням їх характеристик за точністю, надійністю та діапазонами дозування (Vazquez-Santacruz, 2023). Одним зі шляхів універсалізації є застосування нового способу порційного дозування, заснованого на програмному регулюванні витрати дозованого середовища. Цей спосіб забезпечить високу точність дозування, а також гнучкість у виборі діапазонів дозування. (Isermann, 2023; Badiru, & Omitaomu, 2023). Однак для реалізації цього способу необхідно розробити прості за конструкцією контрольно-вимірювальні елементи в системні цифрові комплекси моніторингу пакувального обладнання. (Kartmann, Koltay, & Zengerle, 2015).

Сучасні пакувальні машини, які оснащені мехатронними модулями, зокрема і дозувально-фасувальними, облаштовані контурами контролю за двома та більше технологічними параметрами. Такі контури контролю розроблені на базі типових схем приводів із перетворювачем витрат. (Kryvoplias-Volodina, 2017). Стандартна методика проектування виробничих систем і реалізації їх системи керування на елементній базі промислової пневмоавтоматики має низку недоліків, зокрема невисокий ступінь уніфікації та введення спеціальних додаткових елементів. (Shurong Ning, 2021). Широке застосування IIOT мереж для модулів пакувальних машин забезпечує пожежо- та вибухобезпечність обладнання, що є однією із важливих вимог більшості виробництв. (Gavva, & Kryvoplias-Volodina, 2021).

У працях (Hocken, & Pereira, 2011; DeMaria, 2020) розглянуто системи об'ємного дозування, які застосовуються пакувальними машинами з відносно стабільними параметрами дозованих продуктів. Такі системи є простими та надійними,

проте мають обмежену точність. Дизайн компонованого рішення системи дозування з ваговиміральною апаратурою забезпечують більш високу точність, проте вони є складними, дорогими та мають недостатню швидкодію при дозуванні рідин. (Wright, & Gerhart, 2009). Актуальними є також питання точності дозування. Замкнені системи автоматичного регулювання витратами, з регулювальними клапанами, забезпечують низьку точність при малих величинах продуктивності. (Stanislao Patalano, 2020). Це пояснюється нестабільністю характеристик клапанів під час роботи з малими перепадами тисків. (Ashutosh Singh, 2023).

У статті (Vavřík, 2022) докладно описано методику розроблення компоновання частотно-імпульсних систем керування дозувально-фасувальними модулями. Такі системи мають високу точність і швидкодію, проте вони також є складними та дорогими. На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що чинні системи дозування мають низку недоліків, зокрема обмежену точність, складність і високу вартість.

Для розв'язання цих проблем необхідно розробити нові системи дозування, які будуть мати високу точність, швидкодію та економічність.

Метою статті є дослідження комунікативного дизайну виробничих систем на прикладі цифрового моніторингу пневмоприводу у реальному часі. Для досягнення мети було виконано такі завдання: проведено аналіз комунікативного дизайну виробничих систем; розроблено алгоритм побудови системи цифрового моніторингу; спроектовано експериментальну систему цифрового моніторингу пневмоприводу.

Матеріали і методи. На основі математико-статистичних методів дослідження Simulink здійснено синтез комунікативної виробничої системи для мехатронного модуля дозування на базі газодинаміки. Розроблено експериментальний стенд для верифікації комп'ютерної моделі та виявлення впливу вхідних параметрів на механізм формування й подальшого витиснення дози продукту. Застосовано методику блокової структури Simulink під час синтезу модуля дозування на замкнених системах керування із контрольованим переналаштовуванням тиску, часу, об'єму дози, швидкості подачі продукту в упакування. Комунікативний дизайн дослідного мехатронного дозувально-фасувального модуля сформовано малоінерційною й універсальною структурою відносно операцій порційного і безперервного дозування.

Результати і обговорення. Під час розробки комунікативного дизайну виробничих систем обрано методику блокової структури Simulink. Для перевірки гіпотези про можливість розроблення спрощеної об'єктно-орієнтованої комп'ютерної моделі мехатронного дозувально-фасувального модуля обрано комбіновану електропневматичну систему керування. На рис. 1 представлено алгоритм синтезу системи для цифрового моніторингу пневмоприводу перевантажувального модуля конвеєрної підвідної мережі в реальному часі.

Задача цифровізації дослідного модуля супроводжувалась чисельним моделюванням, для обґрунтованого вибору оптимального варіанта синтезу цифрової моделі. Отримані результати змінних кінематичних і динамічних характеристик роботи дослідного пневмоприводу під час роботи в межах заданого технічного регламенту.

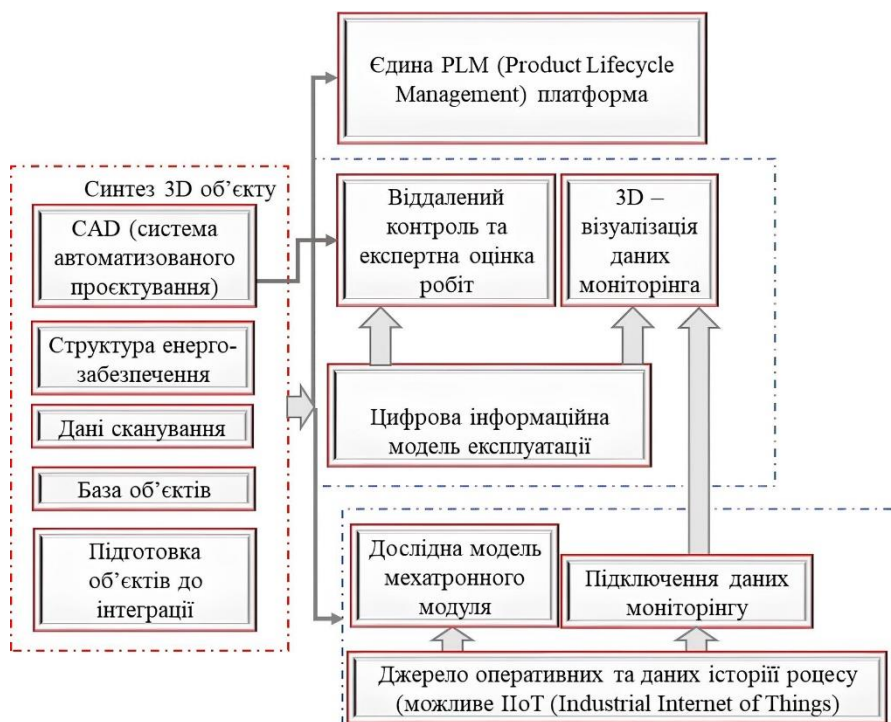


Рис. 1. Структурна схема комунікативного дизайну досліджуваного модуля

Досліджуваний електронний модуль пристрою керування (рис. 2), сформовано програмними блоками Simscape Fluids, що дає змогу керувати заданою дозою за допомогою електромагнітного клапана. Вихідні умови процесу комунікації: вхідний сигнал керування 4—20 мА, максимальний струм — 1 А; трансформування ШІМ сигналу, керування на базі електромагнітних клапанів й подальше формування дози продукту.

Дослідженнями враховані статичні та динамічні параметри системи керування модуля. Здійснено блоковий вибір щодо подальшого моделювання технологічних параметрів процесу дозування. Це забезпечило уточнення метрологічних характеристик досліджуваної мехатронної системи.

Для забезпечення фізичних експериментів сформовані схеми складових комунікативних мехатронних дозувально-фасувальних модулів і розроблені алгоритми керування процесом підвищення точності формування дози. Експериментально досліджена реалізація різних законів зміни тиску за допомогою модуля керування, під час зміни дози продукту (рис. 3).

Авторами проведено дослідження параметрів гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля за допомогою комп'ютерної моделі. Досліджувалися такі параметри: тиск всередині модуля; швидкість руху дозованого продукту в фасувальному патрубку; точність сформованої дози в споживчому упаковуванні. Вимірювання проводилися під час встановлення різних типів сигналу керування:

напівхвиля синусоїдна; хвиля синусоїдна; хвиля східчаста; хвиля трикутна; хвиля пилоподібна.

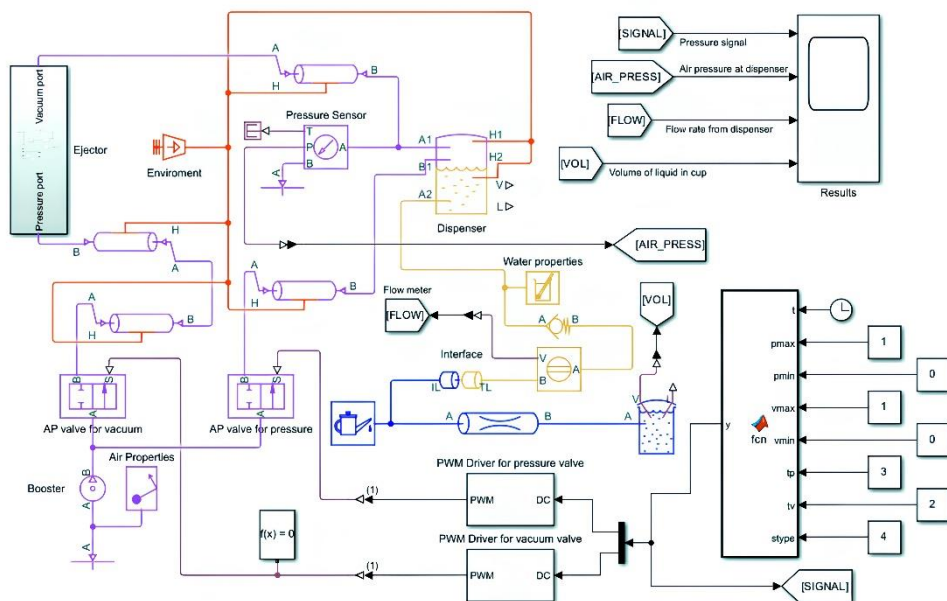


Рис. 2. Комп'ютерна модель мехатронного дозувально-фасувального модуля реалізована Matlab Simulink

Моделювання здійснювалося з дотриманням таких умов: максимальний робочий тиск від 3 до 6 барів; тиск в дозаторі від 1 до 3 барів; швидкість продукту під час фасування в межах $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; фіксований об'єм дозування від 50 до 200 м^3 .

Результати дослідження показали, що швидкість і тиск під час роботи моделі дозування підтримують стабільні показники впродовж всього моделювання під впливом вхідної дії на синусоїдну напівхвилю та пилоподібну хвилю. Точність дозування фіксується у межах 0,92%. Під час випробувань комп'ютерної моделі визначена точність повторювань формування дози у межах $\pm 0,22\%$ та 0,9% від встановленої величини маси дози 50...200 мл.

Поліноміальні рівняння, побудовані у межах графіків експериментального дослідження, показали високі значення коефіцієнтів апроксимації $R^2=0,98$, що вказує на високий ступінь достовірності апроксимації. Узагальнені результати впливу змін кінематичних параметрів на стабілізацію процесу перевантаження досліджуваного об'єкта. Максимальний тиск досягається в поршневій порожнині за 0,02 с, що підтверджує отримані результати математичної моделі. Синтез системи цифрового моніторингу пневмоприводу в реальному часі забезпечує прийняття оптимальних управлінських рішень.

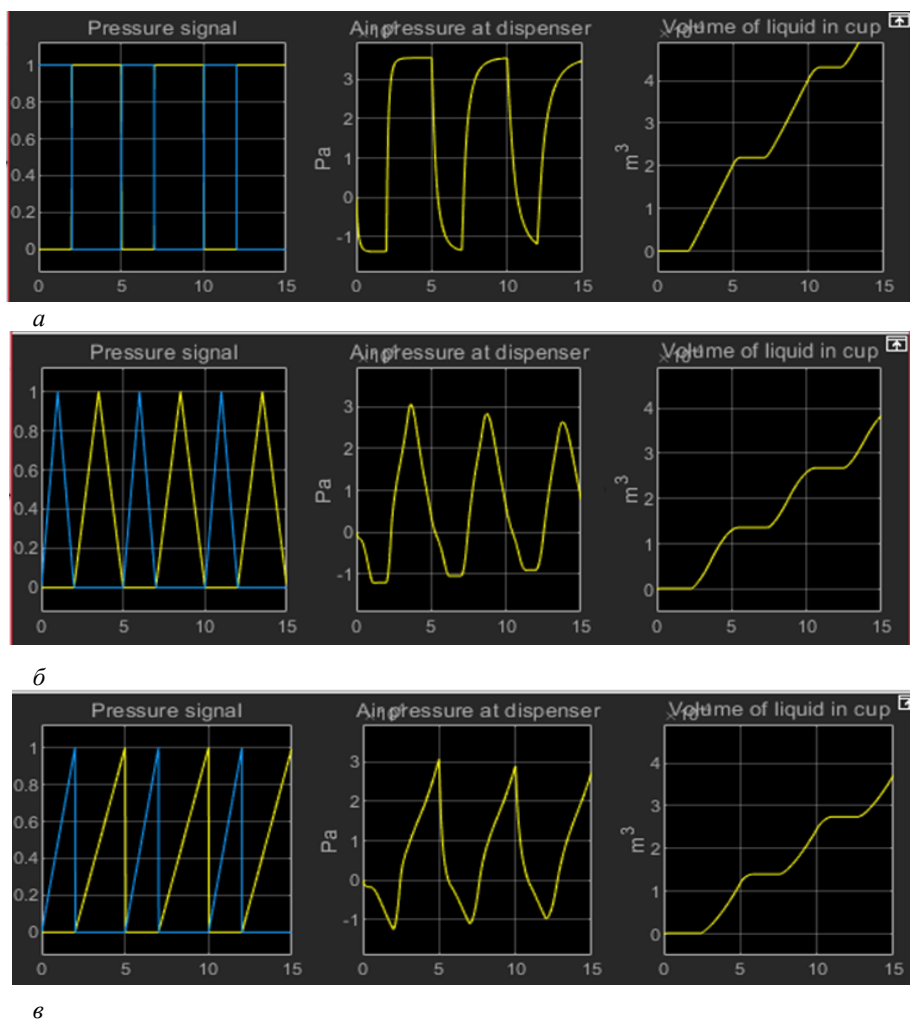


Рис. 3. Результати моделювання реакцій мехатронного дозувально-фасувального модуля на різні вхідні впливи: а — хвиля східчаста; б — хвиля трикутна; в — хвиля пилоподібна

Висновки

Здійснено аналітичні дослідження процесу дозування рідких продуктів, зокрема питної води, за допомогою гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля.

Дослідження здійснені за такими етапами: опис окремих етапів процесу дозування та прийнятих допущень; формування програм Simulink програмного комплексу Matlab; розробка комп'ютерної моделі роботи гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля.

Граничні умови сформовані з урахуванням впливів програмно встановлених режимів під час дозування, із застосуванням драйвера й відтвореної в моделі геометрії продуктопроводу. Значення струму під час моделювання формувалось —

мА (точність 0,001 мА) до стандартної шкали $I_{\min}$, $I_{\max}=4...20$ мА. Комп'ютерна модель сформована за допомогою диференціальних рівнянь змінення кінематичних параметрів рідини під час витиснення дози продукту. Швидкість і тиск під час роботи моделі дозування підтримують стабільні показники впродовж всього моделювання під впливом вхідної дії на пилоподібну хвилю.

Література

Vazquez-Santacruz, J. A. (2023) Towards an integrated design methodology for mechatronic systems Research in Engineering Design. Springer-Verlag London Ltd., doi:<https://doi.org/10.1007/s00163-023-00416-4>.

Rolf, Isermann (2023). Designs and Specification of Mechatronic Systems. Rolf Isermann. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-96729-1_13.

Badiru, A. B., & Omitaomu, O. A. (2023). Systems 4.0: Systems Foundations for Industry 4.0 (1st ed.). CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9781003312277>.

Kartmann, S., Koltay, P., Zengerle, R. (2015) Pressure transducer for medical applications employing radial expansion of a low-cost polymer tube. *Procedia engineering*, 120, 1213—1216. URL: <http://surl.li/jkyqe>.

Kryvoplias-Volodina, L. (2017). Structuralparametric synthesis of hydro-mechanical drive of hoisting and lowering mechanism of package-forming machines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/7 (89), 39—44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111552>.

Shurong, Ning (2021) Research on micro-liquid dispensing driven by a syringe pump with the consideration of air volume. *Microsystem Technologies*, 27(8): 1—14. doi:<https://doi.org/10.1007/s00542-020-05133-9>.

Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L., (2021) Synthesis of a precision dosing system for liquid products based on electro-pneumatic complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* *this link is disabled*, 6(2—114), 125—135. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247187>.

Hocken, R. J., & Pereira, P. H. (2011). Coordinate Measuring Machines and Systems (2nd ed.). CRC Press. 592 p. doi: <https://doi.org/10.1201/b11022>.

DeMaria, K. (2020). The Packaging Development Process: A Guide for Engineers and Project Managers. doi: <https://doi.org/10.1201/9781482278897>.

Wright, T., & Gerhart, P. (2009). Fluid Machinery: Application, Selection, and Design, Second Edition (2nd ed.). doi:<https://doi.org/10.1201/b15836>.

Stanislao, Patalano (2020) Concurrent Multi-domain Modelling and Simulation for Energy-Efficient Mechatronic Systems. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-07555-1_8.

Ashutosh, Singh. (2023) Machine Configuration Based on Machine Reliability and Production Rate Criteria Through Line Balancing Algorithm in Reconfigurable Manufacturing System (RMS). *Industrial Engineering Research Group*, 1120—1145. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1308-4_14.

Vavrik, V. (2022) Designing of Machine Backups in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Appl. Sci.*, 12, 2338. doi:<https://doi.org/10.3390/app12052338>.