

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-11>

УДК 664.14:658.52.011.56:007.52

Д. В. Дмитревський^{1,2}, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-1330-7514

О. Є. Загорюлько², канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-1186-3832

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного² Державний біотехнологічний університет

e-mail: dmitrevskyidv@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОТОКОВИХ ЛІНІЙ І РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ У ВИРОБНИЦТВІ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБІВ

Анотація. У статті розглянуто актуальні питання автоматизації поточкових ліній кондитерського виробництва через інтеграцію інтелектуальних роботизованих комплексів. Обґрунтовано необхідність переходу від жорстких автоматизованих систем до гнучких кіберфізичних структур у межах концепції Індустрії 4.0. Основну увагу приділено застосуванню дельта-роботів, оснащених системами технічного зору й алгоритмами глибокого машинного навчання, що дає змогу забезпечити делікатне поводження з крихкою продукцією та здійснювати контроль якості в реальному часі. Описано принципи адаптивного керування технологічними параметрами, які дають змогу стабілізувати реологічні властивості кондитерських мас. Результати дослідження підтверджують, що впровадження запропонованих рішень підвищує продуктивність ліній, мінімізує частку браку та значно скорочує час переналагодження обладнання при зміні асортименту продукції.

Ключові слова: автоматизація, кондитерська промисловість, поточкові лінії, роботизовані комплекси, промислові роботи, системи керування, технологічний процес.

Постановка проблеми. Сучасна харчова промисловість, зокрема її кондитерська галузь, перебуває на етапі глобальної трансформації, зумовленої переходом до четвертої промислової революції (Industry 4.0). Кондитерське виробництво характеризується надзвичайно високою інтенсивністю технологічних процесів, широким асортиментом продукції та жорсткими вимогами до санітарно-гігієнічних норм. У цих умовах традиційні методи організації виробництва, що базуються на частковій автоматизації або значній частці ручної праці, вичерпали свій ресурс ефективності. Головна суперечність сьогодення полягає між усе більшими вимогами ринку до якості, індивідуалізації та швидкості постачання продукції й обмеженими можливостями застарілих технічних систем.

Однією з ключових проблем галузі є нестабільність якісних показників сировини, що безпосередньо впливає на роботу автоматизованих ліній. Кондитерські маси (шоколад, карамель, тісто) мають складні реологічні властивості, які змінюються залежно від температури, вологості й часу обробки. Наявні поточкові лінії часто не мають достатньої адаптивності для миттєвого реагування на ці зміни без зупинки конвеєра або втручання оператора. Це призводить до зростання відсотка браку та перевитрати дорожоговартісної енергії [1].

Паралельно із цим гостро стоїть питання гнучкості виробництва. Сучасний споживач вимагає постійного оновлення асортименту, що змушує підприємства часто переналаштовувати обладнання. Класичні автоматизовані лінії, спроектовані під один вид продукції, стають економічним тягарем через тривалий час простою під час переходу на нові формати виробів. Саме тут виникає потреба в інтеграції роботизованих комплексів, здатних виконувати широкий спектр операцій – від дозування й декорування до групового пакування – шляхом простої зміни програмного забезпечення або захоплюючих пристроїв [2].



Проте впровадження робототехніки в кондитерський сектор стикається з низкою специфічних технічних бар'єрів. По-перше, це складність маніпулювання крихкими та делікатними виробами. Роботизована система повинна мати високу чутливість і використовувати спеціалізовані адаптивні захоплювачі (наприклад, вакуумні або м'які силіконові), щоб не пошкодити структуру продукту. По-друге, інтеграція роботів у наявні поточкові лінії вимагає створення складних систем технічного зору. Робот має не просто рухатися за заданою траєкторією, а в режимі реального часу ідентифікувати форму, орієнтацію та навіть дефекти кожного виробу на конвеєрі, що рухається з великою швидкістю [3].

Соціально-економічний аспект проблеми також є вагомим. Дефіцит кваліфікованої робочої сили та постійне зростання вартості праці роблять повну автоматизацію не просто бажаною, а необхідною умовою виживання підприємства на конкурентному ринку. Проте швидка роботизація є нові вимоги до кібербезпеки та надійності систем керування. Будь-який збій у програмному забезпеченні роботизованого комплексу в умовах безперервного поточкового виробництва може призвести до масштабних збитків, псування великих партій сировини й тривалого виходу з ладу всього технологічного ланцюга [4].

Окремої уваги потребує проблема енергоефективності. Сучасні роботизовані комплекси споживають значну кількість енергії, і їх упровадження має бути математично й економічно обґрунтованим. Необхідно розробити алгоритми оптимального керування, які б забезпечували максимальну продуктивність при мінімальних енерговитратах, урахувавши динамічні характеристики механізмів [5].

Таким чином, наукова проблема полягає у відсутності комплексного підходу до створення інтелектуальних систем керування, які б об'єднували традиційні поточкові лінії з гнучкими роботизованими комплексами в єдину екосистему. Існує нагальна потреба в розробці нових методів моделювання та синтезу алгоритмів адаптивного керування, які дадуть змогу мінімізувати вплив людського фактору, забезпечити стабільну якість кондитерських виробів у динамічних умовах виробництва й підвищити загальну рентабельність галузі. Вирішення цих питань дасть можливість створити теоретичну та практичну базу для проектування кондитерських підприємств, де роль людини зміститься від безпосереднього виконання операцій до стратегічного нагляду за високотехнологічними системами.

Аналіз останніх досліджень. Сучасний стан наукових розробок у сфері автоматизації харчових виробництв характеризується переходом від жорстко детермінованих систем до адаптивних та інтелектуальних структур. Аналіз наукової літератури останнього десятиліття дає змогу виділити кілька ключових напрямів, за якими розвивається автоматизація кондитерської галузі [6].

Перший напрям охоплює фундаментальні дослідження в галузі математичного моделювання динаміки поточкових ліній. Основна увага в цих роботах приділяється опису нелінійних процесів, що відбуваються під час термічної та механічної обробки кондитерських мас. Акцентується увага на необхідності створення систем автоматичного регулювання, які здатні враховувати зміну реологічних властивостей сировини (в'язкості, пластичності, адгезії) у реальному часі. Розроблено численні алгоритми регулювання й нечіткої логіки, які дають змогу стабілізувати якість напівфабрикатів, проте їхня інтеграція в єдині комплекси з виконавчою робототехнікою залишається складним інженерним завданням [7].

Інші дослідження присвячені впровадженню систем комп'ютерного зору й інтелектуальної ідентифікації об'єктів. Описано методи сегментації зображень для сортування виробів за формою, кольором і наявністю поверхневих дефектів. Сучасні підходи базуються на використанні згорткових нейронних мереж, що дає змогу автоматизованим лініям самостійно адаптуватися до зміни асортименту без переналаштування апаратних датчиків. Проте питання швидкодії



таких систем в умовах високошвидкісного конвеєрного руху (понад 100 одиниць продукції за хвилину) потребує подальшого вдосконалення обчислювальних алгоритмів.

Інше дослідження фокусується на кінематиці й динаміці роботизованих комплексів паралельної структури (дельта-роботів) [8]. У фахових виданнях доведено, що саме такі маніпулятори є найбільш ефективними для операцій переміщення та пакування в кондитерському виробництві завдяки низькій інерційності й високій точності позиціонування. Окрему увагу приділяють розробці «м'яких» захоплювальних пристроїв, виготовлених із харчового силікону, що дає змогу маніпулювати делікатними виробами без пошкодження їхньої структури [9].

Останні роки в науковому середовищі активно обговорюється концепція «цифрових двійників» (Digital Twins) і промислового інтернету речей. Дослідження підтверджують, що створення віртуальних моделей поточкових ліній дає змогу оптимізувати енергоспоживання та прогнозувати моменти виходу обладнання з ладу за методикою «Predictive Maintenance». Це значно підвищує загальну ефективність обладнання (ОЕЕ) та зменшує кількість незапланованих зупинок [10].

Попри значні успіхи в окремих напрямках, аналіз наявних рішень свідчить про відсутність цілісної методології побудови інтегрованих систем, де потокова лінія та роботизований комплекс працюють як єдиний інтелектуальний організм [11]. Більшість публікацій розглядають ці елементи як окремі одиниці автоматизації. Також залишається недостатньо вивченим питання енергетичної оптимізації сумісної роботи багатьох маніпуляторів на одній лінії. Необхідність усунення цих прогалин і зумовила актуальність статті, спрямованої на синтез комплексних рішень для автоматизації кондитерських підприємств.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є розробка комплексної методики автоматизації поточкових ліній кондитерського виробництва шляхом інтеграції гнучких роботизованих комплексів у єдину інтелектуальну систему керування. Дослідження спрямоване на синтез адаптивних алгоритмів взаємодії маніпуляторів із динамічним конвеєрним потоком, що забезпечить мінімізацію браку при роботі з делікатними виробами, підвищення енергоефективності обладнання та скорочення часу переналагодження ліній при зміні асортименту продукції в умовах сучасного цифрового виробництва

Основна частина. Сучасна концепція автоматизації кондитерського виробництва базується на створенні інтелектуальних систем, де кожен вузол потокової лінії розглядається як активний елемент єдиної цифрової мережі. Перехід від традиційних механічних зв'язків до гнучких роботизованих комплексів вимагає докорінного перегляду архітектури керування й упровадження принципів кіберфізичних систем [12]. Ефективна автоматизація в сучасних умовах починається з розгортання багаторівневої структури, де нижній рівень охоплює сенсори та виконавчі механізми, а верхній забезпечує координацію рухів через промислові логічні контролери [13]. Використання високошвидкісних протоколів передачі даних дає змогу синхронізувати швидкість конвеєрної стрічки з динамікою маніпуляторів у реальному часі, що є критично важливим для збереження цілісності делікатних кондитерських виробів, таких як зефір або глазуровані цукерки.

Найбільш перспективним технічним рішенням для кондитерської галузі є впровадження роботів паралельної кінематики, відомих як дельта-роботи. Завдяки мінімальній масі рухомих частин вони здатні виконувати надшвидкі операції переміщення, що значно перевищує можливості людини. Процес роботизованого укладання виробів базується на безперервному циклі, що включає сканування потоку, планування траєкторії та м'яке захоплення [14]. На етапі сканування система технічного зору миттєво визначає координати й кут орієнтації кожного об'єкта на стрічці. Після цього програмний модуль розраховує оптимальну точку перехоплення, ураховуючи інерційні характеристики маніпулятора. Математичне моделювання таких

рухів вимагає вирішення складних диференціальних рівнянь динаміки, що дає змогу реалізувати адаптивне керування з випередженням для компенсації вібрацій конвеєра [15].

На рисунку 1 показана схема функціонування автоматизованої потокової лінії з роботизованим комплексом у кондитерському виробництві.

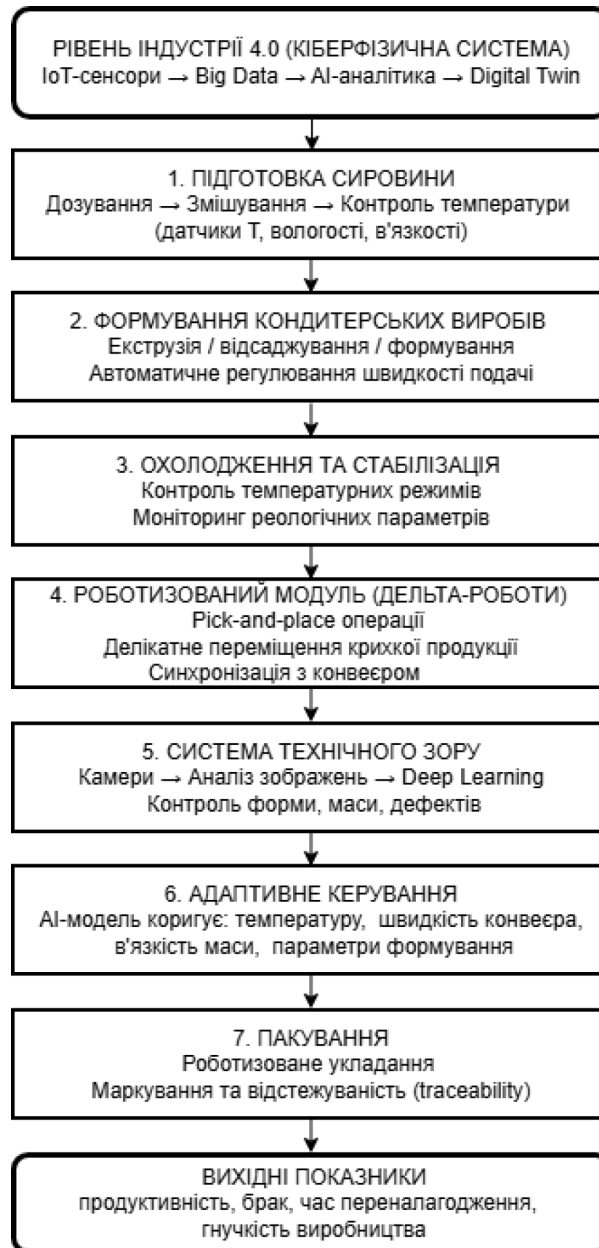


Рис. 1. Схема функціонування автоматизованої потокової лінії з роботизованим комплексом у кондитерському виробництві

Важливим складником автоматизації є інтелектуальні системи технічного зору, які виходять за межі простого визначення координат. Упровадження алгоритмів глибокого машинного навчання дає системі змогу не лише ідентифікувати виріб, а й проводити його комплексну дефектоскопію безпосередньо в потоці. Нейронні мережі аналізують геометричні параметри, колір і цілісність поверхні продукції, автоматично відсіюючи брак без зупинки лінії. Це забезпечує безпрецедентний рівень контролю якості, який неможливо реалізувати за допомогою традиційних оптичних датчиків [16]. Одночасно з механічними операціями автоматизація



повинна охоплювати й параметри технологічного середовища. Оскільки кондитерські маси є надзвичайно чутливими до температурних коливань, застосовуються каскадні системи регулювання. Зовнішні контури контролюють якісні показники продукту на виході, а внутрішні миттєво коригують подачу енергоносіїв у сорочки обладнання, що дає змогу уникнути теплової інерції та мінімізувати перевитрати сировини [17].

Особлива увага в процесі автоматизації приділяється гнучкості виробництва в межах концепції Індустрії 4.0. Проблема тривалого переналагодження ліній при зміні асортименту вирішується через упровадження рецептурного керування [18]. Використання сучасних інтерфейсів дає оператору змогу миттєво завантажувати нові профілі роботи, після чого роботи автоматично змінюють програмні траєкторії, а системи зору – моделі розпізнавання об'єктів [19]. Такий підхід трансформує жорстку потокову лінію на універсальну виробничу платформу, здатну працювати з широким спектром продукції з мінімальними простоями. Інтеграція цих рішень у загальну ERP-систему підприємства забезпечує прозорість логістичних процесів і дає змогу відстежувати ефективність кожної одиниці обладнання в реальному часі [20].

Енергетичний аспект автоматизації також відіграє ключову роль, оскільки велика кількість роботизованих вузлів підвищує навантаження на мережу. Розробка алгоритмів оптимізації циклів руху маніпуляторів дає змогу мінімізувати споживання енергії під час холостих пробігів, що позитивно впливає на собівартість продукції. Крім того, сучасні комплекси інтегрують системи безпеки нового покоління, де лазерні сканери контролюють робочу зону й дають людині можливість безпечно взаємодіяти з технікою без необхідності встановлення фізичних бар'єрів. У підсумку комплексна автоматизація та роботизація створюють синергетичний ефект, де стабільність якості поєднується з високою продуктивністю, що є основою для створення конкурентоспроможного виробництва майбутнього

Висновки. Аналіз і теоретичне обґрунтування підтверджують, що комплексна автоматизація поточкових ліній з упровадженням роботизованих комплексів є ключовим чинником підвищення ефективності кондитерського виробництва. Інтеграція дельта-роботів, оснащених системами технічного зору й алгоритмами машинного навчання, дає змогу розв'язати проблему маніпулювання крихкою продукцією при збереженні високої швидкості конвеєрного потоку. Установлено, що перехід до інтелектуальних систем керування за принципами Industry 4.0 забезпечує безпрецедентну гнучкість виробничих процесів, скорочуючи час переналагодження обладнання та мінімізуючи вплив людського фактору на якість готових виробів. Запропоновані підходи до адаптивного регулювання технологічних параметрів створюють підґрунтя для зниження енерговитрат і відсотків браку, що сукупно підвищує конкурентоспроможність підприємства на сучасному ринку.

Список використаних джерел

1. Mohammed S., Mohammadi M., Sharma S., Rana V. S., Sood S. Assessment of advancements and applications of robotics, artificial intelligence, and automated technology in the modern food sector. *Agriculture and Food Security*. 2025. Vol. 14, № 101261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101261>
2. Alonso R., Sánchez T.F., Alfaro D.A., Cruz Y.J., Villalonga A., Castaño F. Automation and Robotics Pilot Lines in the Context of Industry 5.0. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(5), № 2510. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15052510>
3. Xiong Y. B., Patle B. K., Pawar S. Prospects of robotics in food processing: an overview. *Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*. 2023. № 23209. DOI: <https://doi.org/10.21595/jmeacs.2023.23209>
4. Liberty J.T., et al. Advancing food manufacturing: Leveraging robotic solutions for enhanced quality assurance and traceability across global supply networks. *Trends in Food Science & Technology*. 2024. 104705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104705>.



5. Lyu Y., Wu F., Wang Q., Liu G., Zhang Y., Jiang H. A review of robotic and automated systems in meat processing. *Frontiers in Robotics and AI*. 2025. 1578318. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1578318>
6. Zhang Y., et al. Design of an intelligent automated system for food manufacturing. *Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 233. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.017>
7. Дейниченко Г. В., Дмитревський Д. В., Гузенко В. В., Афукова Н. О. Аналіз застосування мембранних апаратів для виробництва соків із плодової сировини. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь. 2021. С. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2021-21-1-36-43>*
8. Dmytrevskiy D., Horielkov D., Chervonyi V., Sefikhanova K., Rybchuk L. Investigation of the Process of Making Applesauce and Development the Device for its Implementation. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. Proceedings of the 8th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2025, June 17–20, 2025, Porto, Portugal-Volume 2: Mechanical Engineering*. P. 13–27. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_2.
9. Kumar S., et al. Automation in food processing: recent trends and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. № 98. P. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.008>
10. Siciliano B., Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer. 2016. 1200 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
11. Groover M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. 5th ed. Prentice Hall. 2015. 688 p. DOI: <https://doi.org/10.1142/9789812771336>
12. Cherevko O. I., Deinychenko G. V., Dmytrevskiy D. V., Guzenko V. V., Heier H. V., Tsvirkun L. O. Application of membrane technologies in modern conditions of juice production. *Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2020. Вип. 2(32). С. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4369743>
13. Deinychenko G. V., Dmytrevskiy D. V., Zolotukhina I. V., Perekrest V. V., Guzenko V. V. Directions of improvement of processes of membrane separation of juices from fruit and berry raw materials. *Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2021. Вип. 1 (33). P. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5036090>
14. Дейниченко Г. В., Золотухіна І. В., Дмитревський Д. В., Гузенко В. В., Перекрест В. В., Гладкова О. С. Сучасні технології баромембранних процесів у харчовій промисловості. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2021. № 2(43). С. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2021-43-2-86-93>
15. Al-Turki U., et al. A review of industrial robotics in manufacturing. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. № 3. P. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814019835638>
16. Monostori L., et al. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65(2). P. 621–641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
17. Lee J., Bagheri B., Kumar, A. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *CIRP Annals*. 2017. Vol. 66. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.015>
18. Villani V., et al. Fog computing and its role in the automation of manufacturing cells. *Computers in Industry*. 2019. Vol. 108. P. 138–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.11.003>
19. Bogue R. Robots in food manufacturing: a review of applications. *Industrial Robot: An International Journal*. 2018. Vol. 45(6). P. 498–507. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-04-2018-0080>
20. Pathak P., Sa, S. Modular and reconfigurable robot for factory automation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. Vol. 99. P. 543–558. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01145-9>

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





D. Dmytrevskiy^{1,2}, A. Zagorulko²

¹ *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

² *State Biotechnological University*

AUTOMATION OF PRODUCTION LINES AND ROBOTIC SYSTEMS IN CONFECTIONERY MANUFACTURING

Summary

The article deals with the complex problems of automating production lines and integrating robotic systems within the modern confectionery manufacturing sector. Confectionery production is characterized by high-speed technological processes, sensitive raw materials, and strict requirements for product aesthetics. Traditional automation often lacks the flexibility required to adapt to rapidly changing consumer demands and the diverse physical properties of products such as chocolates, biscuits, and delicate pastries. The study is based on the principles of the Industry 4.0 concept, focusing on the transition from rigid mechanical automation to flexible cyber-physical systems. The research investigates the application of parallel kinematics, specifically delta robots, synchronized with high-speed conveyor belts. A significant part of the work is dedicated to the implementation of artificial intelligence, specifically deep learning neural networks, into computer vision systems to ensure real-time quality inspection and object orientation detection. The author proposes a hierarchical control architecture that integrates programmable logic controllers with robotic cells through real-time industrial communication protocols. The research demonstrates that the use of adaptive soft grippers and force-sensing technologies allows robotic complexes to handle fragile items without compromising their structural integrity. Furthermore, the implementation of recipe-based management systems significantly reduces downtime during product changeovers. The study also addresses the issues of energy efficiency and predictive maintenance, showing that digital twin modeling can optimize the energy consumption of robotic arm trajectories. The findings confirm that the integration of intelligent robotics into confectionery streamlines leads to a synergistic effect, enhancing both productivity and product quality. The proposed automation framework minimizes the impact of human error, ensures total quality control, and provides the necessary flexibility for small-batch production. This research provides a theoretical and practical basis for the technological modernization of food industry enterprises aiming to improve their global competitiveness in the digital age.

Keywords: automation, confectionery industry, production lines, robotic systems, industrial robots, control systems, technological process.