

УДК 006.01:378

DOI <https://doi.org/10.32782/cusu-pmtp-2025-1-9>

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ НА БАЗІ ARDUINO

Кононенко Сергій Олексійович,

кандидат педагогічних наук, доцент,

доцент кафедри інформатики, програмування, штучного інтелекту та технологічної освіти

Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка

ORCID ID: 0000-0001-6637-4994

Scopus-Author ID: 58019608800

Кононенко Леся Віталіївна,

кандидат економічних наук, доцент,

доцент кафедри економіки і фінансів

Херсонського державного аграрно-економічного університету

ORCID ID: 0000-0001-5698-5003

Scopus-Author ID: 58019608700

Статтю присвячено особливостям методичного забезпечення вивчення та застосування електроприводів у робототехнічних системах на платформі Arduino в контексті технологічної освіти. Актуальність дослідження зумовлена дедалі більшою роллю технологічної освіти у формуванні висококваліфікованих фахівців, здатних проектувати, розробляти та впроваджувати інноваційні рішення в галузі робототехніки. Методологічна основа дослідження містить глибокий аналіз наявних підходів до викладання робототехніки, а також застосування комплексу взаємодоповнювальних загальнонаукових методів, серед яких особливе місце посідають логічне узагальнення теоретичних положень, системний підхід до розгляду складних технічних об'єктів, а також методи індукції і дедукції для формування висновків на основі емпіричних даних та теоретичних розробок.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що цілеспрямоване та систематичне впровадження спеціальних методичних рекомендацій вивчення електроприводів, адаптованих до специфіки робототехнічних систем на основі доступної та функціональної платформи Arduino, є не лише важливим, а й стратегічно необхідним елементом якісної сучасної технологічної освіти, що повністю відповідає поточним вимогам індустрії та освітніх стандартів. У статті докладно розглядається та описується практична методика, що містить усі необхідні етапи розрахунку основних технічних параметрів різноманітних типів електроприводів, які використовують у робототехніці. Особливу увагу приділено питанням розробки ефективних алгоритмів керування як серво-, так і кроковими двигунами із застосуванням апаратних та програмних можливостей платформи Arduino, що значно полегшує розуміння складних технічних концепцій.

На основі проведеного аналізу та отриманих результатів автори статті обґрунтовують стратегічну важливість подальшого впровадження розробок вивчення електроприводів у навчальний процес. Особлива увага повинна бути приділена створенню методичних рекомендацій та навчальних матеріалів для малих, але практично значущих проєктів, що виконуються із застосуванням платформи Arduino. Такий підхід допоможе майбутнім педагогам технологічної освіти набути необхідного практичного досвіду, глибоко зрозуміти принципи роботи сучасних робототехнічних систем та розвинути навички, необхідні для успішної професійної діяльності в умовах стрімкого розвитку технологій.

Ключові слова: електропривід, робототехнічні системи, методичні рекомендації, технологічна освіта, сервопривід, кроковий двигун, зубчасто-пасова передача.

Kononenko Serhii, Kononenko Lesya. Methodical peculiarities for the study and application of an electric drive in robotic systems based on Arduino

The article is dedicated to the development of methodical support for the study and application of electric drives in robotic systems on the Arduino platform within the context of technological education. The relevance of the

research is determined by the growing role of technological education in forming highly qualified specialists capable of designing, developing, and implementing innovative solutions in the field of robotics. The methodological basis of the research includes an in-depth analysis of existing approaches to teaching robotics, as well as the application of a set of complementary general scientific methods, among which logical generalization of theoretical propositions, a systematic approach to the consideration of complex technical objects, and methods of induction and deduction for forming conclusions based on empirical data and theoretical developments occupy a special place.

The conducted research unequivocally established that the purposeful and systematic implementation of specially developed methodical recommendations for the study of electric drives, adapted to the specifics of robotic systems based on the accessible and functional Arduino platform, is not only important but also a strategically necessary element of quality modern technological education that fully meets current industry requirements and educational standards. The article details and describes a practical methodology that includes all the necessary stages of calculating the basic technical parameters of various types of electric drives used in robotics. Special attention is paid to the development of effective control algorithms for both servo and stepper motors using the hardware and software capabilities of the Arduino platform, which greatly facilitates the understanding of complex technical concepts.

Based on the analysis and results obtained, the authors substantiate the strategic importance of further implementation of electric drive study developments in the educational process. Particular attention should be paid to the creation of methodical recommendations and educational materials for small but practically significant projects implemented using the Arduino platform. This approach will allow future engineers and technological education teachers to gain the necessary practical experience, deeply understand the principles of modern robotic systems, and acquire the skills necessary for successful professional activity in a rapidly developing technological environment.

Key words: electric drive, robotic systems, methodical peculiarities, technological education, servo drive, stepper motor, Gear and belt drive.

Вступ. Підготовка майбутніх спеціалістів у галузі технологічної освіти передбачає вивчення робототехнічних систем у межах курсу машинознавства. На сучасному етапі виникають нові виклики, пов'язані з підготовкою студентів у цій сфері. Зокрема, це стосується використання сучасних інструментів для розробки робототехнічних систем, створення відповідного програмного забезпечення, інтеграції мікропроцесорної техніки та застосування новітніх виконавчих механізмів.

Порівняно з традиційними методами автоматизації, робототехнічний підхід до створення машин з комп'ютерним управлінням має низку переваг: знижену вартість завдяки уніфікації та стандартизації компонентів й інтерфейсів, підвищену точність рухів завдяки використанню інтелектуального управління, високу надійність, компактність конструктивних модулів, покращені динамічні характеристики машин, а також можливість гнучкої комплектації функціональних модулів у складні системи для розв'язання конкретних задач.

На сьогоднішній день робототехнічні системи набули широкого поширення в різноманітних галузях, включно з верстатобудуванням, робототехнікою, аерокосмічною та оборонною промисловістю, автомобільною індустрією, розробкою нетрадиційних транспортних засобів (як-от електровелосипеди, гіроборди та інвалідні візки), медичне обладнання та побутову техніку (пральні, швейні, посудомийні машини тощо).

Система керування приводом промислового робота є типовим прикладом робототехнічної системи. Ключовими елементами такої системи є пристрій управління на базі мікропроцесора, сам мікропроцесор та пристрій управління серводвигуном.

Мета статті – представити методичні рекомендації щодо вивчення та практичного застосування електроприводів у робототехнічних системах з використанням платформи ARDUINO.

Аналіз досліджень та публікацій. Основним напрямом розвитку техніки та технологій є вдосконалення наявних і впровадження нових видів обладнання, технологічних процесів та засобів їх механізації та автоматизації. До таких засобів автоматизації можна зарахувати роботів. Формування теоретичних знань та практичних навичок, необхідних для розробки й проектування робототехнічних систем, здатних до ефективної інтеграції в сучасні автоматизовані

виробничі процеси, здатність аналізувати, моделювати та оптимізувати робототехнічні системи, ураховуючи особливості їх конструкції, функціонування та взаємодії з іншими технологічними комплексами, є важливим завданням у підготовці вчителя технологій. Досягнення світового досвіду створення нового й модернізації наявного технологічного обладнання та значний інтерес науковців до цієї проблеми показує високу динаміку розвитку регульованих електроприводів, комп'ютерних засобів автоматизації, використання інформаційних засобів. Аналіз наукових робіт [1; 2; 4; 7–9], проведений нами, вказує що для забезпечення руху виконавчих механізмів промислових роботів використовують приводи різних типів: електромеханічні, пневматичні та гідравлічні. Наприклад, пневматичний привод є найбільш ефективним у випадках, коли необхідна висока швидкість реакції за невеликої вантажопідйомності маніпулятора ПР та невисокої точності позиціонування. Гідравлічний привод застосовують за більшої вантажопідйомності, вимог до плавності ходу та високої точності позиціонування маніпулятора. Електромеханічний привод є оптимальним для середньої вантажопідйомності та вільного програмування ПР.

Дослідження [3; 5; 6; 10] вказує, що зараз найбільш популярним для керування серводвигунами є використання платформи ARDUINO. Також варто зазначити, що є проблеми в добірї відповідних контролерів для керування роботою крокових двигунів. Отже, є певні проблеми як у розвитку робототехнічних систем, так і в методиці їх вивчення студентами – майбутніми вчителями технологій.

Наявність невирішених питань у контексті досліджуваної проблеми вимагає розробки відповідних рекомендацій щодо вивчення та застосування сучасних електроприводів для керування різноманітними робототехнічними системами в межах курсу машинознавства, що стосуються організації освітнього процесу вивчення робототехнічних систем студентами.

Матеріали та методи. Для дослідження окресленої проблематики використано комплекс наукових методів, серед яких основні: аналіз, узагальнення, синтез, індукція і дедукція.

Результати. У процесі розробки та створення студентами робототехнічних систем, а саме робота-маніпулятора, постає завдання вибору відповідного сервоприводу, який би задовольняв усі вимоги, висунуті до його роботи. Вибір електродвигуна для різних механізмів роботів доцільно здійснювати у зворотній послідовності, починаючи з аналізу кінематичної схеми маніпулятора від кінцевої ланки до початкової (рис. 1).

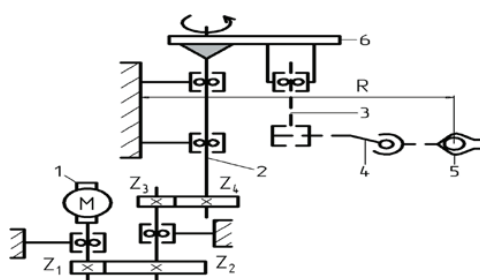


Рис. 1. Схема електропривода поворотної колони маніпулятора ПР:(Адаптовано з [4])
(1 – електромотор; 2 – поворотна стійка; 3 – маніпуляторна рука; 4 – кисть;
5 – пристрій захвату; 6 – плече; приводи для руки й кисті не відображені)

Методика попереднього розрахунку параметрів (без урахування динамічних факторів) містить такі етапи:

1. Визначення початкових значень:

а) навантаження, а саме: загальний момент опору обертанню ($M_{тр}$, вимірюється в Ньютон-метрах) та вага (m , у кілограмах) елементів кожної наступної ланки маніпулятора ПР, включно з вагою об'єкта, що підлягає маніпуляції;

б) коефіцієнт корисної дії (ККД) η , який є результатом множення ККД усіх механізмів маніпулятора, що приводяться в дію цим електроприводом;

в) робоча швидкість кінцевої ланки маніпулятора, яка може бути лінійною (V , у метрах за хвилину) або кутовою (ω , у радіанах за секунду);

г) передавальне число й механізми ланки, що обслуговуються цим електромотором. Це число розраховується як добуток передавальних чисел кожного механізму, що входить до складу цієї ланки.

Указані параметри встановлюються на основі конструкції маніпулятора (див. рис. 1), яка визначає орієнтовну масу та відстані до центрів мас ланок маніпулятора, а також масу корисного вантажу, тобто найбільшу вагу об'єкта виробництва, з яким працюватиме маніпулятор.

2. Обчислення обертового моменту електромотора.

3. Визначення необхідної частоти обертання валу електромотора.

4. Обчислення необхідної потужності електромотора.

Добір електромотора здійснюється з використанням відповідного каталогу. Після завершення етапу розробки основних елементів та механізмів маніпулятора виконується контрольний розрахунок для перевірки правильності вибору електромотора. Цей розрахунок базується на еквівалентному моменті та часі прискорення до номінальної швидкості, тобто на основі уточнених параметрів.

З огляду на те, що вивчення роботи серводвигуна не передбачено при вивченні курсу машинознавства, постає завдання ознайомити студентів з принципом його роботи. Оскільки студентам уже відомі будова й принцип роботи електродвигуна постійного струму, доцільно ознайомити їх лише з особливостями будови серводвигунів.

Переходячи до вивчення роботи серводвигуна, варто звернути увагу, що під сервоприводом часто розуміють механізм з інтегрованим електромотором, здатний повертатися на заданий кут і фіксувати це положення. За своєю суттю, сервопривід – це приводний механізм із замкнутим контуром управління, що забезпечує високоточне керування параметрами руху. Будь-який механічний привод, оснащений сенсором (датчиком положення, швидкості, зусилля тощо) та блоком управління, що автоматично підтримує задані параметри відповідно до поставленого завдання, можна класифікувати як сервопривід. У робототехнічній системі сервопривід отримує на вхід керівний сигнал. Наприклад, заданий кут повороту. Блок управління обробляє цей сигнал, порівнюючи його з поточними даними, отриманими від датчика. На основі цього порівняння приводний механізм виконує певні дії, як-от поворот, прискорення або уповільнення, прагнучи мінімізувати розбіжність між заданим і фактичним значеннями параметра.

Отже, сервопривід становить регульований електромотор-редуктор, типова конструкція якого містить приводний механізм на основі двигуна постійного струму, плату керування та потенціометр для забезпечення зворотного зв'язку.

Для управління сервоприводом використовують імпульсні сигнали з постійною частотою і змінною тривалістю імпульсу. Необхідне положення сервоприводу визначається тривалістю цих імпульсів. При надходженні керівного сигналу схема управління генерує еталонний імпульс, тривалість якого задається потенціометром. Далі відбувається порівняння тривалості вхідного та еталонного імпульсів. Якщо тривалості відрізняються, активується електромотор. Напрямок обертання залежить від того, який з імпульсів коротший. Коли ж тривалості імпульсів зрівнюються, електромотор зупиняється.

Бібліотека Servo для Arduino за замовчуванням використовує діапазон тривалості імпульсів від 544 мкс (для 0°) до 2400 мкс (для 180°). Заводські налаштування для конкретних моделей сервоприводів можуть відрізнятися від цих стандартних значень. Важливо враховувати, що наведені значення є усередненими. Навіть сервоприводи однієї моделі можуть мати пев-

ний виробничий розкид параметрів, що впливає на фактичний робочий діапазон тривалості імпульсів. Для забезпечення високої точності позиціонування кожен сервопривід потребує індивідуального калібрування, шляхом експериментального визначення оптимального діапазону імпульсів. У процесі формування керівного сигналу для сервоприводу ключовим параметром є тривалість імпульсів, а не їх частота. Стандартна частота в 50 Гц є рекомендованою, але сервопривід зберігатиме працездатність і в діапазоні частот 40–60 Гц. У разі значного зниження частоти можлива нестабільна робота сервоприводу, що проявляється в ривках та зниженні потужності. Надмірне підвищення частоти може призвести до перегріву та виходу пристрою з ладу. Малопотужні сервоприводи, як-от SG90, можуть під'єднуватися безпосередньо до плати Arduino. Для управління потужнішими моделями рекомендується використовувати зовнішнє джерело живлення.

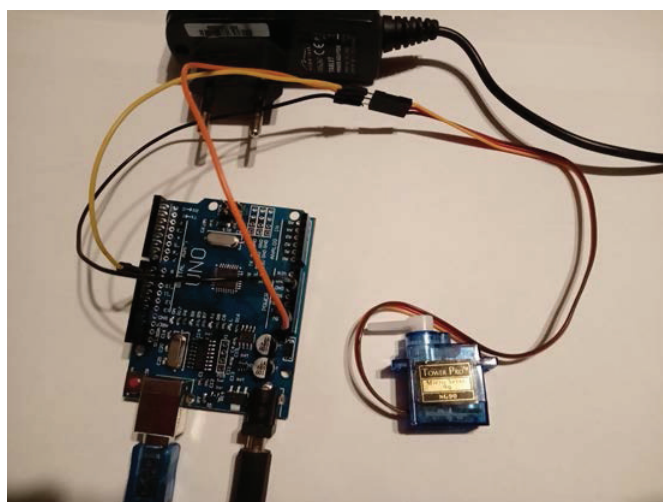


Рис. 2. Під'єднання серводвигуна SG90 до плати ARDUINO

З огляду на те, що студенти спеціальності «Технологічна освіта» не вивчають основ програмування, а вивчення основ робототехніки цього потребує, ми пропонуємо ознайомити їх з основними функціями, які використовують у платформі Arduino.

Плата Arduino Uno та бібліотека Servo надають можливість програмно керувати сервоприводами, забезпечуючи точне управління рухом у різноманітних проєктах.

Керування сервоприводами в середовищі Arduino здійснюється за допомогою низки функцій бібліотеки Servo, кожна з яких виконує певну роль.

Важливо враховувати, що сервоприводи, особливо малопотужні моделі, мають обмеження щодо створюваного ними зусилля. Тому в процесі розробки робототехнічних систем, що вимагають значної потужності та навантаження, більш ефективним рішенням є використання крокових двигунів, як-от NEMA 17. Такі двигуни потребують використання відповідних драйверів.

На рисунку 3 представлено схему під'єднання крокового двигуна до плати Arduino Uno з використанням спеціалізованого драйвера, зокрема контролера A4988. Використання драйвера необхідне для забезпечення належного управління кроковим двигуном, оскільки він гарантує необхідний струм та логіку для його роботи.

З метою спрощення процесу створення програмного коду для керування кроковими двигунами, особливо в частині регулювання швидкості їх обертання, рекомендовано застосовувати зубчасто-пасову передачу. Приклад практичного використання такого підходу в конструкції робота-маніпулятора продемонстровано на рисунку 4.

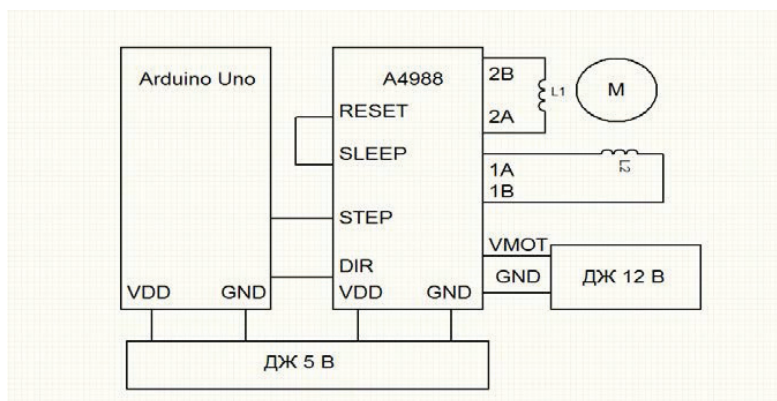


Рис. 3. Принципова схема під'єднання крокового двигуна



Рис. 4. Зовнішній вид крокового двигуна із зубчасто-пасовою передачею

Висновки. Підсумовуючи проведені дослідження, можна стверджувати, що запропоновані методичні рекомендації вивчення та застосування електроприводів на платформі Arduino є ефективним інструментом у підготовці майбутніх фахівців технологічної освіти. Упровадження цих технологій в освітній процес дає змогу не лише опанувати практичні навички розробки та керування робототехнічними системами, а й поглибити розуміння фундаментальних принципів машинознавства та автоматизації.

Дослідження продемонструвало, що діяльність студентів, основана на запропонованих методичних підходах, вимагає від них активного застосування знань з фундаментальних наук, як-от фізика, математика та інформатика. Саме інтеграція теоретичних знань з практичним досвідом конструювання робототехнічних систем створює міцний фундамент для технологічної освіти, сприяючи всебічному розвитку здобувачів.

Застосування Arduino як освітньої платформи дає змогу зробити процес навчання більш інтерактивним, наочним та захопливим. Бібліотека Servo й можливості керування різними типами двигунів – від сервоприводів до крокових двигунів – забезпечують студентам широкий спектр інструментів для реалізації творчих проєктів та експериментів, які, своєю чергою, стимулюють пізнавальну мотивацію і є невід'ємними складниками ефективної підготовки сучасних фахівців, здатних до інноваційної діяльності в галузі робототехніки.

У контексті перспектив подальших досліджень важливим завданням є розробка чіткої системи оцінювання компетентностей, які формуються в студентів у процесі навчання робототехніки з використанням сучасних інструментів. Визначення конкретних індикаторів досягнення компетентностей дасть змогу більш ефективно інтегрувати запропоновану методику в навчальний процес та забезпечити якісну підготовку майбутніх інженерів і педагогів технологічної освіти.

Література:

1. Кононенко С. О., Соменко Д. В. Вивчення та дослідження студентами закладів вищої освіти робототехнічних систем з дистанційним керування. *Наукові записки. Серія: Проблеми природничо-математичної, технологічної та професійної освіти*. 2024. (2). С. 83–89. <https://doi.org/10.32782/cusu-pmtp-2024-2-9>
2. Cano S. A methodological approach to the teaching STEM skills in Latin America through educational robotics for school teachers. *Electronics*. 2022. 11(3), 395. <https://doi.org/10.3390/electronics11030395>
3. Evripidou S., Doitsidis L., Tsinarakis G., Zinonos Z., Chatzichristofis S. A. Selecting a robotic platform for education. In *2022 IEEE International conference on consumer electronics (ICCE)*. 2022. (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCE53296.2022.9730568>
4. Gunes H., Kucuk S. A systematic review of educational robotics studies for the period 2010–2021. *Review of education*. 2022. 10(3), e3381. <https://doi.org/10.1002/rev3.3381>
5. Mohammed Ali, H., Hashim Y., A AL-Sakkal G. Design and implementation of Arduino based robotic arm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022. 12(2), 1411–1411. DOI: 10.11591/ijece.v12i2.pp1411-1418.
6. Novák M., Pech J., Kalová J. An arduino-based robot with a sensor as an educational project. In *Robotics in Education: RiE 2021 12* (pp. 64–71). Springer International Publishing. 2022. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-82544-7_7 (дата звернення 15.02.2025)
7. Sáenz Zamarrón D., Arana de las Casas N. I., García Grajeda E., Alatorre Ávila J. F., Naciff Arroyo J. U. Educational robot arm development. *Computación y Sistemas*. 2020. 24(4), 1387–1401. <https://doi.org/10.13053/cys-24-4-3165>
8. Siciliano B., Khatib O. Robotics and the handbook. In *Springer Handbook of Robotics* (pp. 1–6). Cham: Springer International Publishing. 2016. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-32552-1_1 (дата звернення 15.02.2025)
9. Tzafestas S.G. *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier. 2018. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=gmYALDVqLLUC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Introduction+to+Mobile+Robot+Control&ots=56DJlm1ger&sig=CLfg5pE7ek1pzKO6jMdfACPLSP4&redir_esc=y#v=onepage&q=Introduction%20to%20Mobile%20Robot%20Control&f=false (дата звернення 15.02.2025)
10. Zajc L. Č., Rezelj A., Skočaj D. Low-cost open-source robotic platform for education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2022. 16(1), 18–25. <https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3224227>

References:

1. Kononenko, S. O., Somenko D. V. (2024). Vyvchennia ta doslidzhennia studentamy zakladiv vyshchoi osvity robototekhnichnykh system z dystantsiinym keruvannia [Study and research of robotic systems with remote control by students of higher education institutions]. *Naukovi zapysky. Serii: Problemy pryrodnycho-matematychnoi, tekhnolohichnoi ta profesiinoi osvity* [Scientific notes. Series: Problems of natural-mathematical, technological and professional education], (2), 83-89. <https://doi.org/10.32782/cusu-pmtp-2024-2-9> [in Ukrainian].
2. Cano, S. (2022). A methodological approach to the teaching STEM skills in Latin America through educational robotics for school teachers. *Electronics*, 11(3), 395. <https://doi.org/10.3390/electronics11030395> [in English].
3. Evripidou, S., Doitsidis, L., Tsinarakis, G., Zinonos, Z., & Chatzichristofis, S. A. (2022, January). Selecting a robotic platform for education. In *2022 IEEE International conference on consumer electronics (ICCE)* (pp. 1–6). IEEE. DOI: 10.1109/ICCE53296.2022.9730568. [in English].
4. Gunes, H., & Kucuk, S. (2022). A systematic review of educational robotics studies for the period 2010–2021. *Review of education*, 10(3), e3381. <https://doi.org/10.1002/rev3.3381> [in English].
5. Mohammed Ali, H., Hashim, Y., & A AL-Sakkal, G. (2022). Design and implementation of Arduino based robotic arm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(2), 1411–1411. DOI: 10.11591/ijece.v12i2.pp1411-1418 [in English].
6. Novák, M., Pech, J., & Kalová, J. (2022). An arduino-based robot with a sensor as an educational project. In *Robotics in Education: RiE 2021 12* (pp. 64–71). Springer International Publishing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-82544-7_7 [in English].
7. Sáenz Zamarrón, D., Arana de las Casas, N. I., García Grajeda, E., Alatorre Ávila, J. F., & Naciff Arroyo, J. U. (2020). Educational robot arm development. *Computación y Sistemas*, 24(4), 1387–1401. <https://doi.org/10.13053/cys-24-4-3165> [in English].

8. Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). Robotics and the handbook. In *Springer Handbook of Robotics* (pp. 1–6). Cham: Springer International Publishing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-32552-1_1 [in English].
9. Tzafestas, S.G. (2018). *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier. https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=gmYALDVqLLUC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Introduction+to+Mobile+Robot+Control&ots=56DJlm1ger&sig=CLfg5pE7ek1pzKO6jMdFACPLSP4&redir_esc=y#v=onepage&q=Introduction%20to%20Mobile%20Robot%20Control&f=false [in English].
10. Zajc, L. Č., Rezelj, A., & Skočaj, D. (2022). Low-cost open-source robotic platform for education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 16(1), 18-25. DOI: 10.1109/TLT.2022.3224227 [in English].