

УДК 37.091.313-044.247:[004:5:621.396.6]

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-7>

Олександр МАРТИНЮК

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4473-7883>

Scopus Author ID: 57224619200

Бібліографічний опис статті: Мартинюк, О. (2021). Мікроконтролерна схемотехніка та засоби тривимірного моделювання в системі stem-навчання робототехніки. *Фізика та освітні технології*, 1, 55–61, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-7>

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СХЕМОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В СИСТЕМІ STEM-НАВЧАННЯ РОБОТОТЕХНІКИ

Концепція STEM-навчання базується на практичному застосуванні знань і вмінь для подальшого їх використання у професійній діяльності. Проектний підхід дозволяє здобувачам освіти зрозуміти як STEM-знання застосовуються в реальному житті. У роботі проаналізовано розроблену та апробовану концепцію поєднання можливостей засобів освітньої робототехніки, тривимірного прототипування та програмування мікроконтролерних платформ. 3D-прототипування в робототехніці ефективно тому, що користувач має змогу швидко отримувати результати та впроваджувати свої ідеї у процесі проектування конструкцій. Робототехнічний STEM-проект, виконаний у процесі навчання, може бути не тільки об'єктом вивчення, а й засобом для моделювання, конструювання, інструментом у навчальному експерименті, цифровою лабораторією, інструментом для програмування мікроконтролерів. Як приклад, наведено технологічні аспекти виготовлення та програмування SMARS-платформ. SMARS (Screwless Modular Assemblable Robotic System) – беззвинтова модульна збірна роботизована система, популярний нині технологічний освітній засіб. Це прості платформи, розроблені для навчальних цілей з мінімальною кількістю компонентів, які можна збирати без спеціальних додаткових засобів. Описано послідовність виконання проектів та специфіку програмування їх електронних частин – мікроконтролерних платформ Arduino. Проаналізовано основні функції, які може виконувати SMARS та додаткові елементи конструкції, що розширюють можливості їх використання. Робота над проектуванням та виготовленням конструкцій відкриває низку можливостей для вивчення питань технологічного характеру та активізації пізнавальної діяльності здобувачів освіти. У процесі проектної роботи розвиваються конструкторські й творчі здібності, формуються основи фахової та цифрової компетентності.

Ключові слова: мікроконтролерна схемотехніка, робототехніка, STEM-орієнтоване навчання, проектні технології.

Oleksandr MARTYNIUK

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4473-7883>

SCOPUS AUTHOR ID: 57224619200

To cite this article: Martyniuk, O. (2021). Mikrokontrolerna skhemotekhnika ta zasoby tryvymirnoho modeliuvannia v systemi stem-navchannia robototekhniky [Microcontroller circuit technique and three-dimensional modeling tools in the stem-training system of robotics]. *Physics and Educational Technology*, 1, 55–61, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-7>

MICROCONTROLLER CIRCUIT TECHNIQUE AND THREE-DIMENSIONAL MODELING TOOLS IN THE STEM-TRAINING SYSTEM OF ROBOTICS

The concept of STEM education is based on the practical application of knowledge and skills for their further use in professional activities. The project approach allows students to understand how STEM knowledge is applied in real life. The paper analyzes the developed and tested concept of combining the capabilities of educational robotics tools, three-

dimensional prototyping and programming microcontroller platforms. 3D prototyping in robotics is effective because the user can quickly obtain results and implement their ideas in the design process. A robotic STEM project completed in the learning process can be not only an object of study, but also a tool for modeling, design, a tool in an educational experiment, a digital laboratory, a tool for programming microcontrollers. As an example, the technological aspects of manufacturing and programming SMARS platforms are given. SMARS (Screwless Modular Assemblable Robotic System) is a screwless modular assembled robotic system, a currently popular technological educational tool. These are simple robotic platforms designed for educational purposes with a minimum number of components that can be assembled without special additional tools. The sequence of project implementation and the specifics of programming their electronic parts – Arduino microcontroller platforms – are described. The main functions that SMARS can perform and additional design elements that expand the possibilities of its use are analyzed. Work on the design and manufacture of structures opens up wide opportunities for studying issues of a technological nature and activating the cognitive activity of students. In the process of project work, design and creative abilities are developed, and the foundations of professional and digital competence are formed.

Key words: microcontroller circuit engineering, robotics, STEM-oriented learning, design technologies.

Вступ. Сучасні вимоги щодо підготовки фахівців спонукають до підвищення модернізації природничо-математичного та технологічного складників освітнього середовища на основі впровадження новітніх інструментів. Одним із них є система STEM-орієнтованого навчання, що базується на практичному застосуванні знань і вмінь для подальшого їх використання у професійній діяльності. STEM-освіта забезпечує «... становлення фахівців різних науково-технічних, інженерних професій на базі закладів вищої освіти, а також підвищення професійної майстерності педагогічних працівників із впровадження нових методик викладання, відповідних курсів та реалізації інноваційних проєктів» (ІМЗО, 2024). Організація STEM-навчання здійснюється згідно з планом заходів щодо реалізації Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року (КМУ, 2023). У «Методичних рекомендаціях щодо розвитку STEM-освіти в закладах загальної середньої та позашкільної освіти у 2023/2024 навчальному році» зазначено про необхідність «... застосовувати проєктно-орієнтоване навчання (розроблення навчального проєкту, орієнтуючись на власний досвід та досвід інших); інженерне проєктування (моделювання продуктів); навчання винахідництву (пошук творчих рішень); проблемне навчання (навчання з фокусом на реальні життєві ситуації, що дозволяє здобувачам освіти зрозуміти як STEM-знання застосовуються в реальному житті). ... Варто надавати можливість здобувачам освіти брати участь у STEM-проєктах, співпрацюючи з підприємствами, науковими установами та громадськими організаціями. Це сприятиме формуванню інтересу до STEM-кар'єри» (ІМЗО, 2024).

Для досягнення висунутих завдань нами використано розроблену та апробовану

концепцію поєднання можливостей засобів освітньої робототехніки, тривимірного моделювання (прототипування) та програмування мікроконтролерних платформ. Освітня робототехніка є дидактичною моделлю робототехніки як технологічної галузі. Елементи цієї моделі можуть бути використані для організації вивчення сучасних цифрових технологій з метою популяризації інженерно-технічних та природничо-математичних спеціальностей. Робототехнічний STEM-проєкт, виконаний у процесі навчання, може бути не тільки об'єктом вивчення, а й засобом для моделювання та конструювання, інструментом у навчальному експерименті, цифровою лабораторією, тощо. Проте, при налаштуванні вузлів і механізмів необхідно розуміти фізичні закономірності їх функціонування, враховувати похибки, знати розмірності, тощо (Мартинюк, 2024). Основними технологічними засобами, що забезпечують функціонування роботизованого комплексу є мікроконтролерна платформа, або модуль на основі мікроконтролера. Тому програмування мікроконтролерів, знання мов програмування та вміння виконувати конструктивно-технічну роботу є необхідними умовами виконання робототехнічного проєкту. Сама ж платформа моделюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення та виготовляється за допомогою 3D-принтера. Поєднання можливостей тривимірного прототипування та програмування мікроконтролерів є особливо значимими у проєктуванні засобів освітньої робототехніки (Мартинюк, 2019).

Проєктно-орієнтоване навчання на основі концепції STEM у закладах середньої та вищої освіти забезпечує можливість здобувачам освіти адаптуватись до вимог ринку праці. Це підвищить не тільки конкурентоспроможність

випускників, а й вимоги до рівня навчання для викладачів, коригуванню програм, модернізації та оновлення матеріально-технологічного забезпечення. Аналізуючи стан такого підходу у вітчизняному та зарубіжному освітньому просторі робимо висновок про надзвичайну його актуальність та необхідність впровадження й розвитку. Економіка, бізнес, наука та інші галузі мають велику потребу у кваліфікованих фахівцях, а знання STEM-технологій та практичний досвід їх використання формують для майбутніх фахівців перспективу в роботі та професійній кар'єрі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз праць психолого-педагогічної тематики підтверджують, що залучення здобувачів освіти до розроблення STEM-проектів сприяє розвитку особистості у всіх соціальних сферах (Завалевський, 2021, с. 50-60). Теоретичний аналіз педагогічної літератури засвідчує інтерес науковців до різних аспектів STEM-освіти. Питання освітньої робототехніки та програмування роботизованих платформ досліджується у роботах багатьох зарубіжних дослідників (David, 2012; Eguchi, 2012).

Ефективним інструментом цифрового технологічного забезпечення є поєднання можливостей засобів освітньої робототехніки та тривимірного прототипування. Особливістю використання 3D-прототипування в робототехніці є те, що користувач має змогу швидко отримувати результати та впроваджувати свої ідеї у процесі проектування робототехнічної конструкції. Електронним складником роботизованої системи зазвичай є мікроконтролерна платформа Arduino (About Arduino, 2018), для якої можна створювати програми та керувати електронними пристроями. Для цього необхідно опанувати мову програмування C++. Технології програмування платформи Arduino та особливості впровадження STEM-проектів на базі мікроконтролерів проаналізовано у роботах (Остапчук, 2018; Садовий, 2021). Роботи Беглової (2024), Кошового (2024) присвячено проблемам вивчення програмування платформ Arduino.

Метою статті є аналіз можливостей та приклад використання мікроконтролерних платформ і тривимірного прототипування для проектування роботизованих систем в концепції STEM-орієнтованого навчання здобувачів

освіти спеціальностей фізика, інформатика та технології.

Виклад основного матеріалу дослідження. Робототехніка та конструювання є одним із напрямків STEM-орієнтованого навчання. Нині на ринку існує багато різноманітних засобів (конструкторів, наборів, навчальних комплектів тощо) для вивчення основ проектування роботизованих платформ різного рівня складності. Переважно це конструктори, наприклад Lego, наборів типу WeDo, Makeblock, MAX R/C-TETRIX, тощо. У своєму складі такі набори містять усі необхідні компоненти для самостійного проектування та програмування, вирізняються переважно якісною елементною базою з можливістю різних видів з'єднань пластмасових чи металевих деталей. Окрім цього, такі набори містять базовий модуль або мікроконтролерну платформу з якісним програмним забезпеченням для навчання основам програмування. Для розширення функціоналу виготовлених моделей конструктори комплектуються різноманітними датчиками: світла, температури, ультразвуковими датчиками, гіроскопом, акселерометром та багатьма іншими. Для програмування використовують відомі та популярні платформи Arduino, Micro:bit та інші. Такі конструктори адаптовані для різних вікових категорій користувачів – від дітей молодшого шкільного віку до здобувачів освіти вишів. Проте, маючи усе необхідне для роботи користувачі позбавлені можливості проаналізувати усі технологічні аспекти створення комплектуючих майбутньої моделі та вивчення інструментів для її виготовлення. Тому концепція поєднання тривимірного прототипування та програмування мікроконтролерних платформ у процесі проектування робіт різних конструкцій є значно ефективнішою. І не обов'язково затрачати час на самостійне моделювання складових майбутньої конструкції – це можна виконувати, наприклад, у процесі навчання за програмою вибіркового освітніх компонентів, наприклад, «3D-графіка та прототипування», «Тривимірне моделювання та друк», передбачені програмами навчання у Навчально-науковому фізико-технологічному інституті Волинського національного університету імені Лесі Українки (Каталог ОП, 2024). У вільному доступі нині існує багато інформаційних ресурсів, які містять інструктивні матеріали та безкоштовні для завантаження файли

цікавих технічних рішень, які з дозволу авторів з успіхом можна використовувати в освітньому процесі.

Як приклад, розглянемо конструкцію SMARS платформи, яку здобувачі освіти виготовляють та програмують на практичних заняттях (Рис. 1). SMARS (Screwless Modular Assemblable Robotic System – безгвинтова модульна збірна роботизована система) (What is SMARS?, 2020) – проста роботизована платформа, розроблена для навчальних цілей з мінімальною кількістю компонентів, які можна збирати без гвинтів і пайки чи клею.

Усі необхідні для друку файли можна безкоштовно завантажити із сторінки розробника (SMARS modular robot, 2017). Тут є детальна інформація щодо її монтажу та файли для програмування мікроконтролерної платформи Arduino UNO. Складниками комплекту окрім Arduino UNO ще є два двигуни Mini 150RPM Motors, Adafruit Motor Shield V.1 or V.2 та акумуляторне джерело живлення. Для розширення апаратних функцій, зокрема забезпечення можливості огинання перешкод, передбачено монтаж та програмування ультразвукового датчика відстані HC-SR04.

Перш ніж виконувати монтажні роботи, здобувачі освіти готують .stl-файли до виведення на друк спеціальною програмою для виконання слайсингу та за допомогою 3D принтерів (у нас їх чотири), виготовляють усі необхідні пластмасові компоненти. Кожна група студентів виконує своє завдання, після чого приступають до виконання монтажу конструкції. Така групова

робота забезпечує реалізацію діяльнісного підходу, тобто спрямованість освітнього процесу на розвиток ключових компетентностей і наскрізних умінь, застосування теоретичних знань на практиці, формування здібностей до самоосвіти та командної роботи. Після виготовлення конструкції перевіряють її найпростіші функції, запрограмувавши платформу Arduino UNO. Нагадаємо, що Arduino – апаратно-програмна платформа на базі мікроконтролерів сімейства Atmel AVR та елементів обв'язки для програмування та інтеграції з іншими схемами. Мова програмування Arduino запозичена з середовища програмування „Processing”. Arduino, як і інші аналогічні засоби (Raspberry, Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, MIT's Handyboard тощо) надає можливості користувачу простого і швидкого програмування. У мікроконтролер попередньо прошитий завантажувач, тому немає необхідності у зовнішньому програматорі.

Середовище розробки Arduino має вбудований текстовий редактор програмного коду, компілятор і підключається до апаратної частини Arduino. Програма, написана в середовищі Arduino, називається скетч. Спершу студенти/студентки редагують та завантажують просту програму керування, згідно алгоритму якої платформа рухається вперед, а потім назад. Потім алгоритм ускладнюють поворотами вправо-вліво. Після досягнення бажаного результату, приєднують до конструкції ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 і формують програму для огинання платформою перешкод.

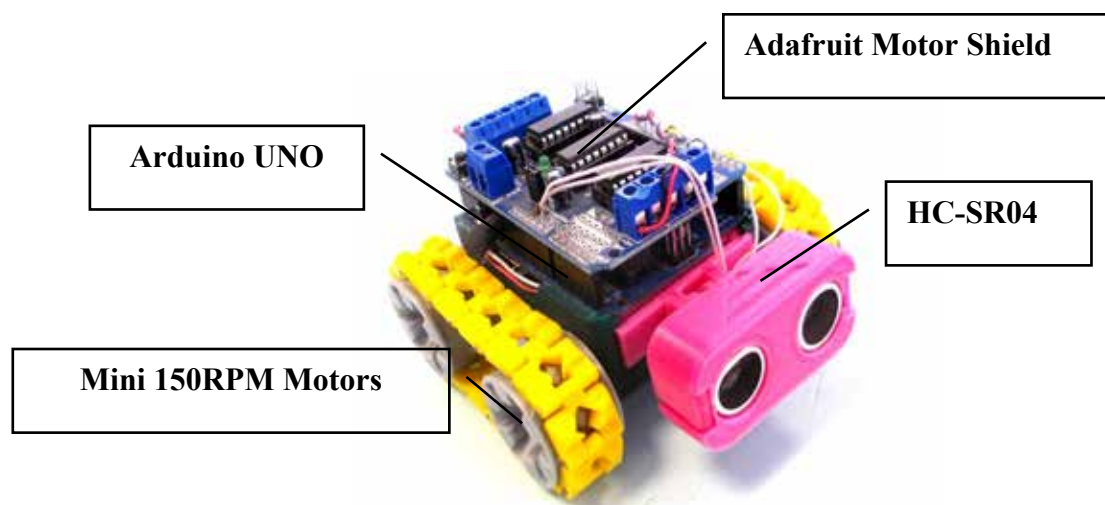


Рис. 1. Конструкція виготовленого SMARS-робота

Доповненням конструкції є універсальний датчик кольору на ISL29125, з яким можна додати функцію розпізнавання кольору і сформувати програму, завантаживши яку забезпечити рух платформи по нанесеній на горизонтальну поверхню лінію. До речі, за таким принципом працюють роботи-офіціанти у закладах громадського харчування, які привозять замовлення до місця призначення, рухаючись по нанесеній на підлозі лінії-маршрутизатору.

І ще одним завданням є кріплення до платформи тримача для олівця (фломастера). Така конструкція забезпечує можливість залишати слід лінії на горизонтальній поверхні, по якій рухається платформа і створити модель своєрідного плоттера. Для цього необхідно написати програму, згідно алгоритму якої платформа рухатиметься за даними координатами і описуватиме траєкторію, яку рисуватиме олівець (фломастер) на горизонтальній поверхні, наприклад паперовому ватмані.

На відміну від запропонованого прототипу (SMARS modular robot, 2017), здобувачами освіти, які виконували проєкт, виготовлено джерело живлення на основі мініатюрної акумуляторної батареї та зарядного модуля. Це забезпечує можливість довготривалого використання

платформи з подальшим підзарядженням батареї без необхідності її заміни, як у оригінальній конструкції.

Конструкцію крокуючого робота-павука (рис. 2) виготовлено здобувачами освіти на практичних заняттях курсу «STERM-технології». Як і описаний вище SMARS-проєкт, основні складники цієї конструкції виготовлено з використанням тривимірного друку. Необхідні для друку файли можна безкоштовно завантажити із сторінки розробника (<https://www.thingiverse.com/thing:2662828>). Учасники проєктної групи, вивчивши згідно програми курсу, готують файли до виведення на друк (виконують слайсинг та налаштування принтерів) та друкують усі необхідні деталі конструкції. Електронними складниками крокуючого робота є мікроконтролерна платформа Arduino Pro mini, сервомотори та шилд сервомоторів, ультразвуковий датчик відстані HC-SR04, з'єднувальні провідники, акумуляторна батарея, модуль заряджання.

Для програмування мікроконтролерної платформи Arduino Pro mini використовуємо програматор. Алгоритм програми передбачає програмування платформи рухатись у заданому напрямку та огинати перешкоди, які фіксує ультразвуковий датчик відстані HC-SR04.

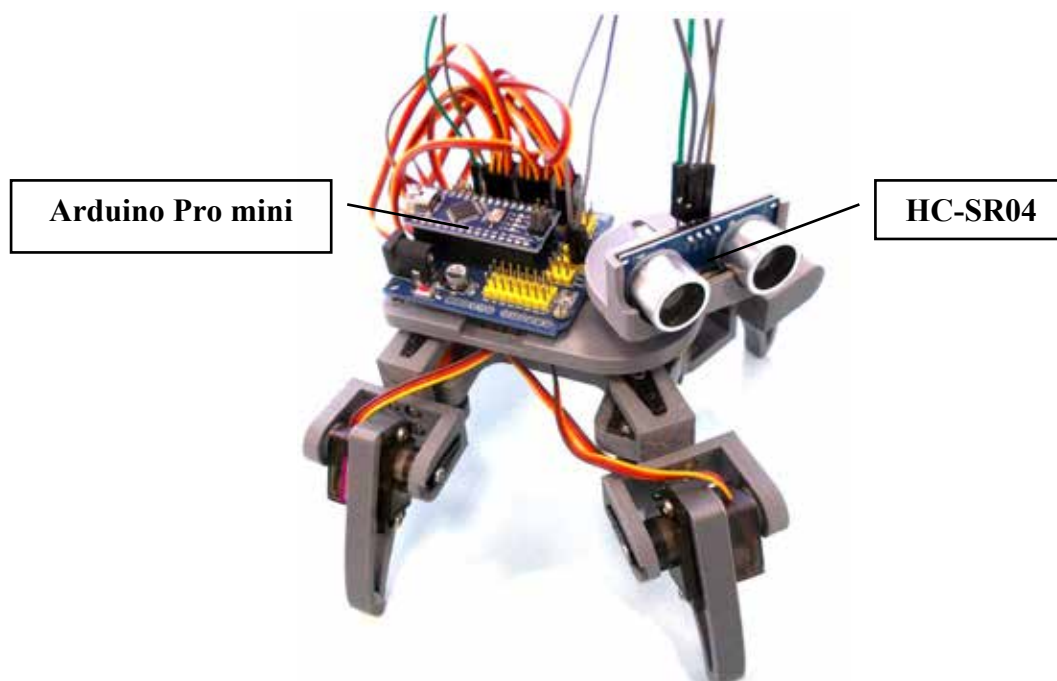


Рис. 2. Конструкція крокуючого SMARS-робота

Висновки і перспективи подальших досліджень. Як переконає досвід, поєднання можливостей засобів освітньої робототехніки, тривимірного прототипування та програмування мікроконтролерів відкриває широкі можливості для вивчення питань технологічного характеру для активізації пізнавальної

діяльності здобувачів освіти. У процесі проєктної роботи розвиваються конструкторські й творчі здібності, формуються основи фахової та цифрової компетентності. Перспективи подальших досліджень вбачаємо у розвитку проєктної роботи щодо конструювання SMARS-платформ.

ЛІТЕРАТУРА:

1. About Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/en/about>
2. Завалевський Ю., Гущина Н., Василяшко І., Коршунова О., Патрикеева О. Створення педагогічних умов для впровадження дослідницького методу навчання з використанням ІТ- та STEM-технологій у закладах загальної середньої освіти. *Наукові записки Малої академії наук України*. № 2-3(21-22). 2021. С. 50–60. URL: <http://www.snman.science/index.php/sn/article/download/80/76>
3. Беглова Н.М., Беглов Я.І., Бегов К.К. Застосування платформи Arduino для вивчення принципів програмування зі школи до університету. *Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference Berlin, Germany*. 1-3 July 2024. С. 39–52 URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/CURRENT-CHALLENGES-OF-SCIENCE-AND-EDUCATION-1-3.07.2024.pdf#page=39>
4. Каталог освітніх програм та вибіркового освітніх компонентів. URL: <https://vnu.edu.ua/uk/all-educations>
5. Мартинюк О. С. Тривимірне прототипування як складник STEM-технологій у конструктивно-технічній і науково-дослідній роботі студентів та учнів. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна / [редкол.: П. С. Атаманчук (голова, наук. ред.) та ін.]*. 2019. Випуск 25. Кам'янець-Подільський. С. 61–64.
6. Мартинюк О.С. Особливості підготовки здобувачів освіти з використанням робототехнічних STEM-проєктів. *Проблеми та інновації в математичній, цифровій, природничій і професійній освіті: збірник матеріалів XVII-ї Міжнародної науково-практичної онлайн-інтернет конференції*, м. Кропивницький, 20-27 червня 2024 року / Відп. ред. М. І. Садовий. 2024. С. 129–131.
7. Arduino controlled 2-joint 8-servo 4-legged Walking Robot. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:4905975>
8. В. Кошовий Особливості впровадження STEM-проєктів робототехніки на базі контролера Arduino на уроках інформатики. *Науково-методичний, інформаційно-освітній журнал*, 2024. № 2(101). С. 53–63 URL: <https://doi.org/10.54662/veresen.2.2024.05>
9. Остапчук С.А., Садовий М.І. До проблеми використання платформи Arduino у вивченні робототехніки. *Наукові записки. Центральнотраїнського державного університету імені Володимира Винниченка Серія «Педагогічні науки»*. Кропивницький, 2018. Вип. 168. С. 178–181.
10. Про затвердження плану заходів щодо реалізації Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-sh-a131r>
11. Садовий М.І., Соменко Д.В., Трифонова О.М. Робототехнічні комплекти в освітньому процесі. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна*. Кам'янець-Подільський, 2021. Вип. 27. С. 125–128.
12. Столяр, Т., Сербин, Б. Використання технологій Arduino в робототехніці на уроках інформатики. *IX Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Сучасні інформаційні технології в освіті та науці»*, 21-22 листопада 2024 р., Житомир. С. 237–239.
13. STEM-освіта. URL: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita/>
14. David T. Butterworth Teaching C/C++ programming with LEGO Mindstorms. 3rd International Conference on Robotics in Education (RIE). Prague, Czech Republic. September 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/327903430_Teaching_CC_programming_with_LEGO_Mindstorms
15. Eguchi A. Robotics as a Learning Tool for Educational Transformation. *Proceedings of 4th International Workshop Teaching Robotics, Teaching with Robotics & 5th International Conference Robotics in Education*, Padova (Italy), 24-37. URL: http://www.terecop.eu/TRTWR-RIE2014/files/00_WFr1/00_WFr1_04.pdf
16. SMARS modular robot. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:2662828>
17. What is SMARS? URL: https://www.smarsfan.com/about/what_is_smars

REFERENCES:

1. About Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/en/about>
2. Zavalevskyi, Yu., Hushchyna, N., Vasylyashko, I., Korshunova, O., & Patrykeieva, O. (2021). Stvorennia pedahohichnykh umov dlia vprovadzhenia doslidnytskoho metodu navchannia z vykorystanniam IT- ta STEM-tekhnologii u zakladakh zahalnoi serednoi osvity [Creating Pedagogical Conditions for Implementing the Inquiry-Based Learning Method Using IT and STEM Technologies in General Secondary Education Institutions]. *Naukovi zapysky Maloi akademii nauk Ukrainy*. № 2-3(21-22). S. 50–60. URL: <http://www.snman.science/index.php/sn/article/download/80/76>
3. Beglova, N.M., Beglov, Ya.I., & Begov, K.K. (2024). Zastosuvannia platformy Arduino dlia vyvchennia pryntsyipiv prohramuvannia zi shkoly do universytetu [Application of the Arduino Platform for Learning Programming Principles from School to University]. Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference Berlin, Germany. S. 39–52. Retrieved from: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/CURRENT-CHALLENGES-OF-SCIENCE-AND-EDUCATION-1-3.07.2024.pdf#page=39>
4. Kataloh osvitnikh prohram ta vybirkovykh osvitnikh komponentiv [Catalogue of Educational Programs and Elective Educational Components]. Retrieved from: <https://vnu.edu.ua/uk/all-educations>
5. Martyniuk, O. (2019). Tryvymirne prototypuvannia yak skladnyk STEM-tekhnologii u konstruktivno-tekhnichnii i nauko-doslidnii roboti studentiv ta uchniv [Three-Dimensional Prototyping as a Component of STEM Technologies in Constructive-Technical and Research Activities of Students and Pupils]. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriiia pedahohichna / [redkol.: P. S. Atamanchuk (holova, nauk. red.) ta in.]. Vypusk 25. Kamianets-Podilskyi*. S. 61-64.
6. Martyniuk, O. (2024). Osoblyvosti pidhotovky zdobuvachiv osvity z vykorystanniam robototekhnichnykh STEM-proiektiv [Peculiarities of Training Learners Using Robotic STEM Projects]. *Problemy ta innovatsii v matematychnii, tsyfrovii, pryrodnychii i profesiinii osviti: zbirnyk materialiv KhVII-yi Mizhnarodnoi nauko-praktychnoi onlain-internet konferentsii, m. Kropyvnytskyi, 20-27 chervnia 2024 roku / Vidp. red. M. I. Sadovyi*. 2024, S.129-131.
7. Arduino controlled 2-joint 8-servo 4-legged Walking Robot. Retrieved from: <https://www.thingiverse.com/thing:4905975>
8. Koshovyi V. (2024) Osoblyvosti vprovadzhenia STEM-proiektiv robototekhniki na bazi kontrolera Arduino na urokakh informatyky [Peculiarities of Implementing Robotics STEM Projects Based on the Arduino Controller in Informatics Lessons]. *Nauko-metodychnyi, informatsiino-osvitnii zhurnal*, 2(101), 53–63. Retrieved from: <https://doi.org/10.54662/veresen.2.2024.05>
9. Ostapchuk, S., & Sadovyi, M. (2018). Do problemy vykorystannia platformy Arduino u vyvchenni robototekhniki [On the Issue of Using the Arduino Platform in Robotics Education]. *Naukovi zapysky. Tsentralnoukrainskoho derzhavnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka Seriiia «Pedahohichni nauky»*. Kropyvnytskyi, 168, 178–181.
10. Pro zatverdzhennia planu zakhodiv shchodo realizatsii Kontseptsii rozvytku pryrodnycho-matematychnoi osvity (STEM-osvity) do 2027 roku [On the Approval of the Action Plan for the Implementation of the Concept for the Development of Science and Mathematics Education (STEM Education) until 2027]. Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-planu-zahodiv-sh-a131r>
11. Sadovyi, M., Somenko, D., & Tryfonova, O. (2021). Robototekhnichni komplekty v osvitnomu protsesi [Robotics Kits in the Educational Process]. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriiia pedahohichna*. Kamianets-Podilskyi, 27, 125–128.
12. Stoliar, T. & Serbyn, B. (2024). Vykorystannia tekhnologii Arduino v robototekhnitsi na urokakh informatyky [Using Arduino Technologies in Robotics during Informatics Lessons]. *IKh Vseukrainska nauko-praktychna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu «Suchasni informatsiini tekhnologii v osviti ta nautsi»*, 21–22 lystopada 2024 r., Zhytomyr.
13. STEM-osvita. Retrieved from: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita/>
14. David, T. (2012). Butterworth Teaching C/C++ programming with LEGO Mindstorms. 3rd International Conference on Robotics in Education (RIE). Prague, Czech Republic. September 2012. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/327903430_Teaching_CC_programming_with_LEGO_Mindstorms
15. Eguchi, A. (2014). Robotics as a Learning Tool for Educational Transformation. Proceedings of 4th International Workshop Teaching Robotics, Teaching with Robotics & 5th International Conference Robotics in Education, Padova (Italy), p. 24–37. Retrieved from: http://www.terecop.eu/TRTWR-RIE2014/files/00_WFr1/00_WFr1_04.pdf.
16. SMARS modular robot. Retrieved from: <https://www.thingiverse.com/thing:2662828>
17. What is SMARS? Retrieved from: https://www.smarsfan.com/about/what_is_smars