

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-92>

УДК 004.896:629.36

НІКОНОВ ОЛЕГ

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-8878-4318>e-mail: nikonov.oy@knu.edu.ua**ФІЛІПОВ ВЯЧЕСЛАВ**

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0001-7854-6693>e-mail: mv650434@gmail.com

КОНЦЕПЦІЯ БАГАТОРІВНЕВОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ НАЗЕМНИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТИЗОВАНИМИ ПЛАТФОРМАМИ

Представлено концепцію побудови багаторівневої інтелектуальної технології управління наземними мобільними роботизованими платформами спеціального призначення. Обґрунтовано необхідність інтеграції різнорівневих систем управління, сенсорних комплексів, алгоритмів навігації та засобів захисту в єдине програмно-апаратне середовище. Запропонована концепція базується на ієрархічній організації рівнів інтелектуальної обробки даних: від сенсорного рівня до рівня стратегічного управління місією. Проведено аналіз сучасних підходів та визначено перспективи практичного застосування багаторівневої технології при створенні роботизованих систем нового покоління.

Ключові слова: інтелектуальні технології, роботизовані платформи, багаторівнева архітектура, сенсорні системи, програмно-апаратна система, інтерфейс оператора

NIKONOV OLEH, FILIPOV VIACHESLAV

Kyiv National University of Technology and Design

CONCEPT OF MULTI-LEVEL INTELLIGENT TECHNOLOGY FOR CONTROL OF GROUND MOBILE ROBOTIC PLATFORMS

The concept of building a multi-level intelligent technology for controlling ground mobile robotic platforms of special purpose is presented. The need to integrate multi-level control systems, sensor complexes, navigation algorithms and protection means into a single software and hardware environment is substantiated. The proposed concept is based on the hierarchical organization of levels of intelligent data processing: from the sensor level to the strategic mission control level. An analysis of modern approaches is carried out and the prospects for the practical application of multi-level technology in the creation of new generation robotic systems are determined.

The results of the study indicate that the integration of multi-level intelligent technologies can significantly increase the autonomy and functional reliability of robotic systems. At the same time, the proposed approach not only meets modern challenges, but also lays the foundation for creating new generation platforms capable of adapting to unpredictable conditions and ensuring the performance of complex tasks with minimal operator involvement.

The implementation of hybrid solutions is a key element of the concept of multi-level intelligent control technology for ground mobile robotic platforms, which allows combining hardware, software and organizational security measures, increases the survivability and fault tolerance of the platform, ensures adaptability to a changing environment and threats, and also contributes to the effective performance of tasks in difficult operating conditions.

Thus, the proposed concept is the basis for the formation of a new paradigm in the design of ground robotic systems, and further scientific research will contribute to its practical implementation and improvement in the direction of creating high-tech solutions capable of meeting the challenges of the future.

Keywords: intelligent technologies, robotic platforms, multi-level architecture, sensor systems, software-hardware system, operator interface

Стаття надійшла до редакції / Received 17.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Сучасні наземні мобільні безпілотні роботизовані платформи (НМБРП) поступово займають ключові позиції у галузях: транспортній, логістичній, оборонній, а також у промисловому та сільськогосподарському секторах. НМБРП здатні виконувати широкий спектр завдань: від ведення розвідки та моніторингу обстановки до забезпечення логістики, транспортування вантажів, евакуації поранених, розмінування територій, вогневої підтримки та участі у складних тактичних операціях. Така багатопрофільність застосування вимагає не лише високої технічної досконалості окремих підсистем, але й їх інтеграції в єдине інтелектуальне середовище, що забезпечує повноцінне функціонування платформи в динамічних умовах [1-8].

Однією з ключових проблем сучасних НМБРП є зростаюча складність операційних сценаріїв. Якщо на початкових етапах розвитку безпілотні платформи здебільшого виконували відносно нескладні функції (рух за заданим маршрутом, дистанційне спостереження, доставка вантажів у межах контрольованої території), то сьогодні від них вимагається виконання багатовимірних завдань у середовищі з високим рівнем невизначеності, наприклад, виконання завдань у зоні бойових дій, де присутні змінні перешкоди, активне протидіяння противника, інформаційні та електронні атаки,

складні погодні умови та обмеженість енергетичних ресурсів.

В умовах сучасних гібридних конфліктів і кризових ситуацій НМБРП повинні забезпечувати: автономність (здатність приймати рішення без постійного втручання оператора); адаптивність (уміння швидко перебудовувати стратегію дій залежно від змін обстановки); робастність (стійкість до фізичних ушкоджень, відмов окремих компонентів і впливу дестабілізуючих факторів); інтегрованість (можливість взаємодії у складі групи, рою або з іншими бойовими й технічними системами); захищеність (стійкість до кібератак, GPS-спуфінгу, радіоелектронного придушення та інших видів загроз).

Проте традиційні методи проектування мобільних роботизованих систем не завжди дозволяють досягти таких характеристик. Зокрема: фрагментарність підходів, ліміти алгоритмічних методів, недостатня автономність, вразливість до атак і відмов, обмеженість енергетичних систем.

У зв'язку з цим постає завдання розроблення нових методологічних і технологічних підходів, які б дозволили подолати зазначені обмеження. Одним із таких рішень є багаторівнева інтелектуальна технологія, що передбачає ієрархічну організацію процесів обробки даних, прийняття рішень і управління рухом та діями роботизованих платформ.

Таким чином, проблема полягає не лише у вдосконаленні окремих підсистем, а у формуванні комплексної багаторівневої технології, що інтегрує сенсорні, навігаційні, обчислювальні та захисні рішення в єдине програмно-апаратне середовище. Реалізація цієї концепції дозволить перейти від локальних рішень до створення цілісних інтелектуальних архітектур, здатних забезпечити ефективність і надійність НМБРП у реальних умовах застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні НМБРП інтегрують алгоритми машинного навчання та комп'ютерного зору для забезпечення автономного пересування в складних умовах [1-3, 7-12]. Використання різноманітних сенсорів, таких як лідари, камери та ультразвукові датчики, дозволяє НМБРП здійснювати сканування навколишнього середовища, виявляти перешкоди та адаптуватися до змінюваних умов, що забезпечує високу точність і надійність у виконанні завдань [4-6]. Розробка багаторівневих систем управління дозволяє ефективно управляти НМБРП в умовах реального часу, що включає в себе використання різних рівнів автономії, від повністю автоматизованих до дистанційно керованих, що забезпечує гнучкість у виконанні завдань [9-12]. Інтеграція різних технологій, таких як електронна боротьба та системи самовідновлення, дозволяє підвищити живучість НМБРП в умовах бойових дій, що забезпечує їх ефективність та безпеку при виконанні складних завдань [7, 13]. Розробка нових моделей систем управління, які враховують вплив електромагнітних перешкод, дозволяє забезпечити стабільну роботу НМБРП в умовах сучасних бойових дій, що включає в себе використання адаптивних алгоритмів та захищених каналів зв'язку [11, 13-14]. Створення універсальних платформ, які можуть бути адаптовані для виконання різноманітних завдань, від логістики до бойових операцій, дозволяє значно розширити можливості НМБРП, що включає в себе використання модульних конструкцій та гнучких програмних рішень [2, 4, 10].

Слід зазначити, що традиційні методи проектування НМБРП не завжди дозволяють досягти необхідних характеристик щодо автономності, надійності та живучості в складних умовах експлуатації. Зокрема, класичні підходи обмежені у можливостях адаптації до динамічних середовищ та інтеграції сучасних сенсорів і алгоритмів штучного інтелекту [1, 3, 12]. Тому сучасні дослідження активно спрямовані на впровадження гібридних та багаторівневих архітектур управління, комбінування різних сенсорних систем, а також на застосування машинного навчання та методів автономної навігації, що дозволяє значно підвищити ефективність та безпеку НМБРП [5, 7-9, 11].

Формулювання цілей статті

Метою статті є розроблення концепції багаторівневої інтелектуальної технології управління сучасних НМБРП, що дозволить підвищити їх автономність, надійність та ефективність у виконанні складних завдань у різних сферах застосування.

Для досягнення мети необхідно вирішення завдань:

1. Аналіз сучасного стану розвитку НМБРП та методів їх проектування, включаючи традиційні та інтелектуальні підходи.
2. Визначення ключових вимог до автономності, живучості та адаптивності НМБРП у складних середовищах.
3. Розробка концепції багаторівневої архітектури управління, яка інтегрує штучний інтелект, сенсорні системи та методи машинного навчання.
4. Розробка гібридних рішень для забезпечення безпеки, захищеності та відмовостійкості платформ.

Реалізація вищезазначених завдань дозволить створити основу для ефективного проектування та впровадження НМБРП нового покоління, здатних адаптуватися до динамічних умов і виконувати широкий спектр операцій без прямої участі людини.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сучасні НМБРП призначені для виконання різноманітних завдань у складних та динамічних умовах. У зв'язку з цим критично важливим є визначення ключових вимог до їх характеристик, що

визначають ефективність, надійність і безпеку системи. Серед основних характеристик виділяють автономність, живучість та адаптивність, які формують основу для проєктування багаторівневих інтелектуальних технологій управління.

Автономність НМБРП визначається здатністю системи самостійно приймати рішення та виконувати завдання без безпосереднього контролю оператора. Високий рівень автономності дозволяє платформі ефективно функціонувати в умовах обмеженого або відсутнього зв'язку з оператором, а також зменшує ризик помилок, пов'язаних із людським фактором. Основні аспекти автономності включають: навігаційну автономність, функціональну автономність, прийняття рішень у реальному часі.

Автономність також передбачає гнучкість у використанні різних режимів управління: від повністю автономного до дистанційно керованого з можливістю втручання оператора у критичних ситуаціях.

Живучість визначає здатність НМБРП підтримувати робочі функції при впливі зовнішніх та внутрішніх загроз, що є критично важливим в умовах бойових дій, промислових аварій, природних катастроф та інших складних середовищ. Основні компоненти живучості включають: стійкість до механічних впливів, стійкість до електромагнітних та кібератак, програмну живучість, систему резервування та самовідновлення.

Живучість тісно пов'язана з автономністю, оскільки автономна платформа повинна ефективно функціонувати навіть при частковому пошкодженні чи відмові окремих модулів.

Адаптивність визначає здатність НМБРП підлаштовуватися під змінні умови середовища, завдання та загрози і забезпечує ефективну роботу в динамічних, непередбачуваних та складних умовах експлуатації. Основні напрямки адаптивності включають: середовищну адаптацію, функціональну адаптацію, адаптацію до загроз і небезпек, навчання на основі досвіду.

Визначення та реалізація вищенаведених вимог є основою для розробки багаторівневої інтелектуальної технології управління, яка передбачає: комбіноване використання сенсорів, алгоритмів штучного інтелекту та багаторівневих архітектур для забезпечення автономності; впровадження гібридних систем живучості, що поєднують апаратні та програмні засоби захисту; застосування адаптивних моделей поведінки для динамічної оптимізації роботи платформи у реальному часі. Такий підхід дозволяє НМБРП ефективно виконувати завдання в умовах складного динамічного середовища, забезпечуючи високу надійність та безпеку, а також оптимальне (раціональне) використання ресурсів платформи.

Багаторівнева архітектура управління передбачає розподіл системи на декілька функціональних рівнів, кожен з яких відповідає за конкретні аспекти роботи НМБРП. Основні принципи такої архітектури включають:

1. Модульність – архітектура повинна складатися з автономних модулів, що відповідають за різні функції: сенсорний збір даних, обробку інформації, прийняття рішень та безпосереднє управління приводами. Модульність забезпечує гнучкість у проєктуванні та можливість швидкого оновлення окремих компонентів без порушення роботи системи в цілому.

2. Ієрархічність – робота платформи організована у вигляді рівнів, де кожен рівень відповідає за певний рівень прийняття рішень: стратегічний (довгострокові плани), тактичний (поточні завдання) та оперативний (безпосереднє управління виконавчими органами). Такий підхід дозволяє координувати діяльність платформи в умовах обмежених ресурсів і високої складності завдань.

3. Інтеграція сенсорних систем і штучного інтелекту – всі рівні архітектури взаємодіють із сенсорними системами, включаючи камери, лідари, ультразвукові та інерційні датчики. Дані з сенсорів обробляються алгоритмами штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволяє приймати оптимальні (раціональні) рішення щодо руху, навігації та виконання місій.

Багаторівнева архітектура НМБРП умовно поділяється на три основні рівні (рис. 1):

Рис. 1. Багаторівнева архітектура НМБРП



Рис. 1. Багаторівнева архітектура НМБРП

1. Стратегічний рівень – відповідає за планування довгострокових цілей та місій платформи. На цьому рівні використовуються алгоритми оптимізації та моделі прогнозування для визначення найбільш ефективного шляху досягнення завдань. Крім того, стратегічний рівень аналізує дані про стан

платформи та навколишнє середовище, визначає пріоритети та формує загальний план дій.

2. Тактичний рівень – забезпечує реалізацію стратегічного плану в умовах динамічного середовища. На цьому рівні відбувається адаптація до змінних умов місцевості, уникнення перешкод, взаємодія з іншими роботизованими системами та коригування маршруту на основі даних сенсорів у реальному часі. Використання методів машинного навчання дозволяє прогнозувати поведінку об'єктів середовища та приймати оптимальні (раціональні) рішення у складних ситуаціях.

3. Оперативний рівень – забезпечує безпосереднє управління виконавчими органами, включаючи колеса, гусениці, маніпулятори та інші механізми. На цьому рівні здійснюється контроль стабільності руху, швидкості, положення платформи та і правильності реалізації заданих операцій. Система оперативного рівня повинна реагувати на миттєві зміни середовища та забезпечувати точне виконання команд тактичного рівня.

Важливою складовою багаторівневої архітектури є інтеграція алгоритмів штучного інтелекту та методів машинного навчання, що забезпечує: аналіз великих обсягів даних сенсорів у реальному часі для визначення стану середовища та потенційних загроз; прогнозування та планування дій платформи, включаючи вибір оптимального маршруту, корекцію траєкторії та адаптацію до нових умов; автоматичне навчання на основі досвіду, що дозволяє покращувати ефективність роботи платформи з часом; прийняття рішень в умовах невизначеності, коли традиційні алгоритми не забезпечують адекватної реакції.

Для забезпечення багаторівневої архітектури необхідно використовувати комплекс сенсорів, наприклад:

1. Камери та системи комп'ютерного зору – забезпечують розпізнавання об'єктів, оцінку відстані та детекцію перешкод;

2. Лідари та радіолокаційні системи – дозволяють створювати тривимірну карту місцевості та визначати точне положення платформи у просторі;

3. Інерційні та GPS-датчики – забезпечують локалізацію та орієнтацію на місцевості.

Дані зі сенсорів обробляються за допомогою алгоритмів штучного інтелекту на різних рівнях архітектури, що забезпечує високу точність та швидкість прийняття рішень.

Впровадження багаторівневої архітектури управління забезпечує: підвищену автономність НМБРП; гнучке реагування на динамічні зміни середовища; інтеграцію різних типів сенсорів та алгоритмів обробки даних; можливість адаптації до різних завдань та умов експлуатації; підвищену надійність та живучість платформи завдяки багаторівневому контролю та резервуванню функцій.

Розробка багаторівневої архітектури управління є ключовим етапом створення НМБРП нового покоління і дозволяє інтегрувати інтелектуальні алгоритми, сенсорні системи та методи машинного навчання у єдину комплексну систему, здатну автономно виконувати складні завдання у реальному часі, адаптуватися до змінного середовища та забезпечувати безпеку й живучість платформи.

Для забезпечення надійної роботи НМБРП необхідно впроваджувати комплексні гібридні рішення, які поєднують апаратні, програмні та організаційні заходи безпеки. Такий підхід дозволяє досягти високої відмовостійкості, підвищити живучість системи та гарантувати виконання поставлених завдань навіть у критичних умовах.

Апаратні аспекти гібридних рішень полягають у використанні модульної конструкції, яка дозволяє швидко замінювати пошкоджені блоки без зупинки роботи всієї системи. Кожен модуль виконує певну функцію, що забезпечує гнучкість і легкість оновлення окремих компонентів. Крім того, резервування критичних елементів, таких як датчики, блоки управління та канали зв'язку, дозволяє підтримувати роботу системи навіть при відмові окремих вузлів. Інтеграція механізмів самовідновлення та самодіагностики сприяє автоматичному відновленню функціонування пошкоджених модулів і забезпечує безперервність виконання завдань. Програмні рішення гібридного підходу підвищують відмовостійкість і захищеність системи через використання адаптивних алгоритмів управління, що дозволяють платформі змінювати стратегію дій у разі непередбачуваних подій. Алгоритми машинного навчання здійснюють аналіз даних сенсорів та поведінки системи для виявлення аномалій і потенційних загроз, що дозволяє оперативно реагувати на них. Резервування програмних модулів та використання альтернативних алгоритмів забезпечує продовження роботи платформи навіть у випадку відмов чи нестабільності роботи основного програмного забезпечення. Системи прогнозування і превентивного реагування на основі штучного інтелекту дозволяють передбачати можливі відмови та автоматично здійснювати заходи для їх запобігання.

Гібридний підхід полягає у взаємній інтеграції апаратних і програмних рішень, що забезпечує підвищену відмовостійкість платформи, комплексну безпеку та адаптивність до загроз. Одночасний захист від фізичних, електронних і програмних загроз у поєднанні з адаптивними алгоритмами, що аналізують поточний стан системи та навколишнє середовище, дозволяє НМБРП коригувати свою поведінку в реальному часі та забезпечувати ефективне виконання завдань у складних умовах.

Окрім апаратних та програмних рішень, важливе значення мають організаційні та процедурні заходи. Регулярне тестування і сертифікація платформи дозволяють оцінити працездатність всіх модулів, перевірити алгоритми безпеки та резервування. Навчання операторів і технічного персоналу підвищує здатність швидко реагувати на відмови та загрози. Документовані процедури відновлення

роботи системи у разі пошкоджень або кібератак дозволяють зменшити час простою і підвищити загальну безпеку експлуатації платформи.

Таким чином, впровадження гібридних рішень є ключовим елементом концепції багаторівневої інтелектуальної технології управління НМБРП, яка дозволяє поєднати апаратні, програмні та організаційні заходи безпеки, підвищує живучість і відмовостійкість платформи, забезпечує адаптивність до змінного середовища і загроз, а також сприяє ефективному виконанню завдань у складних умовах експлуатації.

На рис. 2 наведено приклад апаратної частини для НМБРП, яка включає:

- обчислювальну платформу NVIDIA Jetson Nano Developer Kit, що призначена для розгортання моделей штучного інтелекту та системного контролю;
- мікроконтролер Arduino UNO R4 Minima для управління базовими виконавчими модулями, первинної обробки цифрових сигналів і інтерфейсу до силовій частини;
- камера (сенсор) Intel RealSense D435i основний сенсор для формування тривимірної карти середовища та отримання глибини зображення.



Рис. 2. Приклад апаратної частини для НМБРП

На рис. 3 наведено приклад інтерфейсу оператора для ручного управління НМБРП.

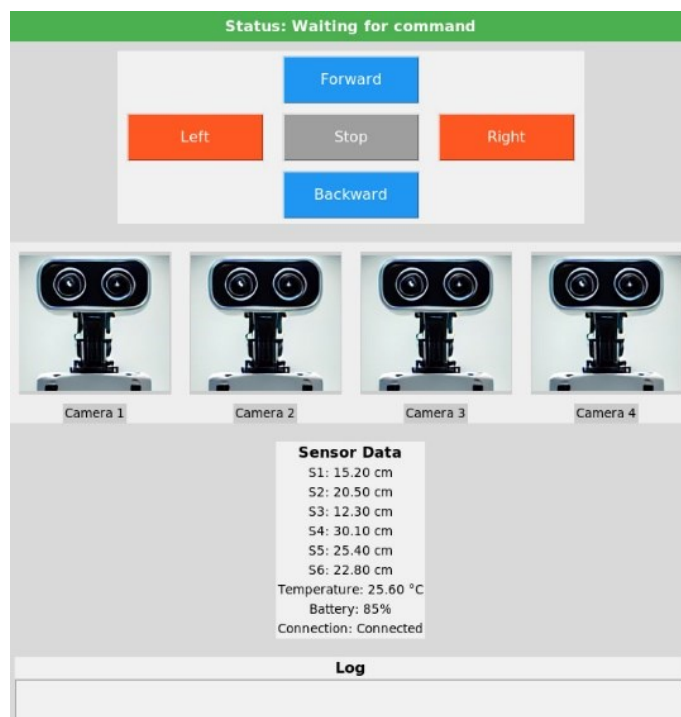


Рис. 3. Приклад інтерфейсу оператора для ручного управління НМБРП

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У проведеному дослідженні обґрунтовано концепцію багаторівневої інтелектуальної технології управління наземними мобільними безпілотними роботизованими платформами. Розглянуто ключові вимоги до автономності, живучості та адаптивності таких систем, що формують основу для підвищення їх ефективності у складних середовищах експлуатації. Запропоновано архітектурні підходи до побудови систем управління, які поєднують штучний інтелект, сенсорні комплекси та методи машинного навчання. Доведено доцільність впровадження гібридних рішень, спрямованих на підвищення безпеки, захищеності та відмовостійкості платформи.

Результати дослідження свідчать, що інтеграція багаторівневих інтелектуальних технологій здатна суттєво підвищити автономність та функціональну надійність роботизованих систем. При цьому запропонований підхід не лише відповідає сучасним викликам, але й закладає основу для створення

платформ нового покоління, здатних адаптуватися до невизначених умов і забезпечувати виконання складних завдань із мінімальним залученням оператора.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямі полягають у поглибленій розробці алгоритмів колективної взаємодії груп роботизованих платформ, удосконаленні методів сенсорної інтеграції для підвищення точності навігації та ситуаційної обізнаності, а також у впровадженні технологій кіберзахисту нового покоління для протидії складним загрозам. Значний потенціал мають дослідження, спрямовані на створення адаптивних енергетичних систем, що забезпечуватимуть енергоефективність і автономність тривалого функціонування платформ. Крім того, важливим завданням є моделювання сценаріїв застосування наземних мобільних безпілотних роботизованих платформ у гібридних умовах, де поєднуються вимоги оборонної, цивільної та промислової сфер.

Таким чином, запропонована концепція є основою для формування нової парадигми у проектуванні наземних роботизованих систем, а подальші наукові дослідження сприятимуть її практичній реалізації та вдосконаленню у напрямі створення високотехнологічних рішень, здатних відповідати на виклики майбутнього.

Література

1. Cangelosi A., Asada M. Cognitive Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series). MIT Press, 2022. – 496 p.
2. Kaltjob P.O.J. Control of Mechatronic Systems: Model-Driven Design and Implementation Guidelines 1st Edition. Wiley, 2021. – 496 p.
3. Billard A., Mirrazavi S., Figueroa N. Learning For Adaptive And Reactive Robot Control: A Dynamical Systems Approach / Massachusetts Institute of Technology. – MIT Press, 2022. – 424 p.
4. Azizi A., Barenji R.V. Industry 4.0: Technologies, Applications, and Challenges (Emerging Trends in Mechatronics) 1st Edition. Springer, 2023. – 274 p.
5. Xie Y., Zheng S., Hu Z., Wang S. Advanced Sensing and Control Technologies for Autonomous Robots. MDPI Books, 2025. – 320 p.
6. Bishop R.H. The Mechatronics 2nd Edition. CRC Press, 2018. – 1416 p.
7. Monteleone S., Negrello F., Grioli G., Catalano M., Bicchi A., Garabini M. A method to benchmark the balance resilience of robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 2022. – V.9. – P. 117–129.
8. Chen W. A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2025. – V.5. – P. 1–19.
9. Nikonov O., Kyrychenko I., Shuliakov V., Fastovec V. Parametric synthesis of a dynamic object control system with nonlinear characteristics // The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020). Zaporizhzhia, Ukraine, April 27 - May 1, 2020, CEUR-WS.org. – P. 91–101.
10. Величко О.М. Гордієнко Т.Б. Інтелектуальні інформаційні системи: структура і застосування. Державний університет телекомунікацій. – Херсон: Олді плюс, 2021. – 727 с.
11. Ніконов О.Я., Скідан В.В., Волівач А.П., Мамонтов В.О. Застосування ONION-архітектури в рамках предметно-орієнтованого підходу // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2024. – № 6 (345). – С. 113–119.
12. Bodyanskiy Y., Chala O., Filatov V., Pliss I. Neo-Fuzzy Radial-Basis Function Neural Network and Its Combined Learning. In: Zgurovsky, M., Pankratova, N. (eds) System Analysis and Artificial Intelligence. Studies in Computational Intelligence. – 2023. – V.1107. Springer, Cham. – P. 323–340.
13. Skvorchevsky A. Increasing the robustness of computer networks by using hybrid centralized-distributed topology, 2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2022. – P. 239–242.
14. Nikonov O., Skidan V., Volivach A., Nadopta T., Pavlenko V. Cloud System of Content Accounting with Access on OC Android and IOS. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023. – P. 1002–1005.

References

1. Cangelosi A., Asada M. Cognitive Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series). MIT Press, 2022. – 496 p.
2. Kaltjob P.O.J. Control of Mechatronic Systems: Model-Driven Design and Implementation Guidelines 1st Edition. Wiley, 2021. – 496 p.
3. Billard A., Mirrazavi S., Figueroa N. Learning For Adaptive And Reactive Robot Control: A Dynamical Systems Approach / Massachusetts Institute of Technology. – MIT Press, 2022. – 424 p.
4. Azizi A., Barenji R.V. Industry 4.0: Technologies, Applications, and Challenges (Emerging Trends in Mechatronics) 1st Edition. Springer, 2023. – 274 p.
5. Xie Y., Zheng S., Hu Z., Wang S. Advanced Sensing and Control Technologies for Autonomous Robots. MDPI Books, 2025. – 320 p.
6. Bishop R.H. The Mechatronics 2nd Edition. CRC Press, 2018. – 1416 p.
7. Monteleone S., Negrello F., Grioli G., Catalano M., Bicchi A., Garabini M. A method to benchmark the balance resilience of robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 2022. – V.9. – P. 117–129.
8. Chen W. A survey of autonomous robots and multi-robot navigation: Perception, planning and collaboration. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2025. – V.5. – P. 1–19.

9. Nikonov O., Kyrychenko I., Shuliakov V., Fastovec V. Parametric synthesis of a dynamic object control system with nonlinear characteristics // The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020). Zaporizhzhia, Ukraine, April 27 - May 1, 2020, CEUR-WS.org. – P. 91–101.
10. Velychko O.M. Hordiienko T.B. Intelktualni informatsiini systemy: struktura i zastosuvannia. Derzhavnyi universytet telekomunikatsii. – Kherson: Oldi plus, 2021. – 727 s.
11. Nikonov O.Ya., Skidan V.V., Volivach A.P., Mamontov V.O. Zastosuvannia ONION-arkhitektury v ramkakh predmetno-orientovanoho pidkhodu // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2024. – № 6 (345). – S. 113–119.
12. Bodyanskiy Y., Chala O., Filatov V., Pliss I. Neo-Fuzzy Radial-Basis Function Neural Network and Its Combined Learning. In: Zgurovsky, M., Pankratova, N. (eds) System Analysis and Artificial Intelligence . Studies in Computational Intelligence. – 2023. – V.1107. Springer, Cham. – P. 323–340.
13. Skvorchevsky A. Increasing the robustness of computer networks by using hybrid centralized-distributed topology, 2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2022. – P. 239–242.
14. Nikonov O., Skidan V., Volivach A., Nadopta T., Pavlenko V. Cloud System of Content Accounting with Access on OC Android and IOS. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023. – P. 1002–1005.