

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

*Анотація.* В роботі розглядаються принципи побудови та організація системи керування безпілотних транспортних засобів. Метою роботи є розвиток принципів побудови систем керування безпілотними транспортними засобами. Вирішені задачі: аналіз засобів збору інформації про стан та положення безпілотних транспортних засобів; розробка узагальненої архітектури системи керування безпілотними транспортними засобами. Запропоновано класифікацію засобів сенсорного сканування. Розроблено узагальнену структуру системи керування, описано її окремі функціональні підсистеми. Представлена архітектура може бути використана при створенні безпілотних транспортних засобів.

*Ключові слова:* безпілотний транспортний засіб, система керування, архітектура, сенсор, датчик, контролер.

**Постановка проблеми.** В епоху цифровізації однією з актуальних задач у транспортній галузі стає впровадження технологій безпілотного керування. Безпілотні транспортні засоби (БТЗ) – вид транспортних засобів, які пересуваються без людини – пілота на борту за допомогою спеціальної системи автономного керування. Саме наявність повноцінної системи автономного керування є відмінною рисою безпілотного транспорту від дистанційно керованих моделей. Основа концепції автономного керування полягає у вимірюванні внутрішніх та зовнішніх параметрів, їх порівнянні та створенні відповідного впливу на управління рухом БТЗ. До ключових компонентів систем керування входять датчики сприйняття, навігаційні підсистеми та алгоритми, алгоритми обробки даних, алгоритми локалізації, динамічні алгоритми планування маршрутів, комунікаційні засоби тощо. В рамках роботи пропонується аналіз принципів побудови системи керування БТЗ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найпростішим втіленням системи керування БТЗ можна уявити кінцевий цифровий автомат, бо БТЗ виконує дії виходячи від поточного стану системи та вхідних даних від датчиків. Проте, як правило, система керування БТЗ не є кінцевим автоматом у класичному сенсі теорії автоматів. Кінцеві автомати є моделями, які мають обмежену кількість станів і переходів між цими станами. Натомість у БТЗ використовуються складніші та гнучкіші методи управління, включаючи елементи штучного інтелекту, машинного навчання, адаптивні алгоритми, генетичні алгоритми та інші технології. Кінцеві автомати знаходять застосування в окремих процесах, наприклад, для автоматичного повернення БТЗ на початкову позицію при втраті зв'язку із пультом керування [1].

БТЗ поділяються на чотири основні категорії в залежності від середовища, у якому вони функціонують [2]: наземні UGV (unmanned ground vehicle), повітряні UAV (unmanned

aerial vehicle), надводні USV (unmanned surface vehicle), підводні UUV (unmanned underwater vehicle). Найбільш розвинутою є категорія UGV, яка представлена легковими та вантажними автомобілями, громадським транспортом, поїздами, різноцільовими колісними, гусеничними та крокуючими роботами. В даній роботі зосередимося саме на категорії UGV.

У доступних джерелах зустрічаються різні бачення архітектурних рішень для систем керування БТЗ [3–5]. Як правило, такі рішення залежать від конкретного набору сенсорів і датчиків.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розвиток принципів побудови систем керування БТЗ. В роботі відповідно до мети поставлені такі задачі: аналіз засобів збору інформації про стан та положення БТЗ; розробка узагальненої архітектури системи керування БТЗ.

**Основний матеріал дослідження.** Зазвичай БТЗ забезпечені широким набором складних та функціональних сенсорів і датчиків. Розглянемо різноманітні види пристроїв, які можуть бути використані для циклічного збору даних у БТЗ (див. рис. 1), назовемо цей процес сенсорним скануванням.

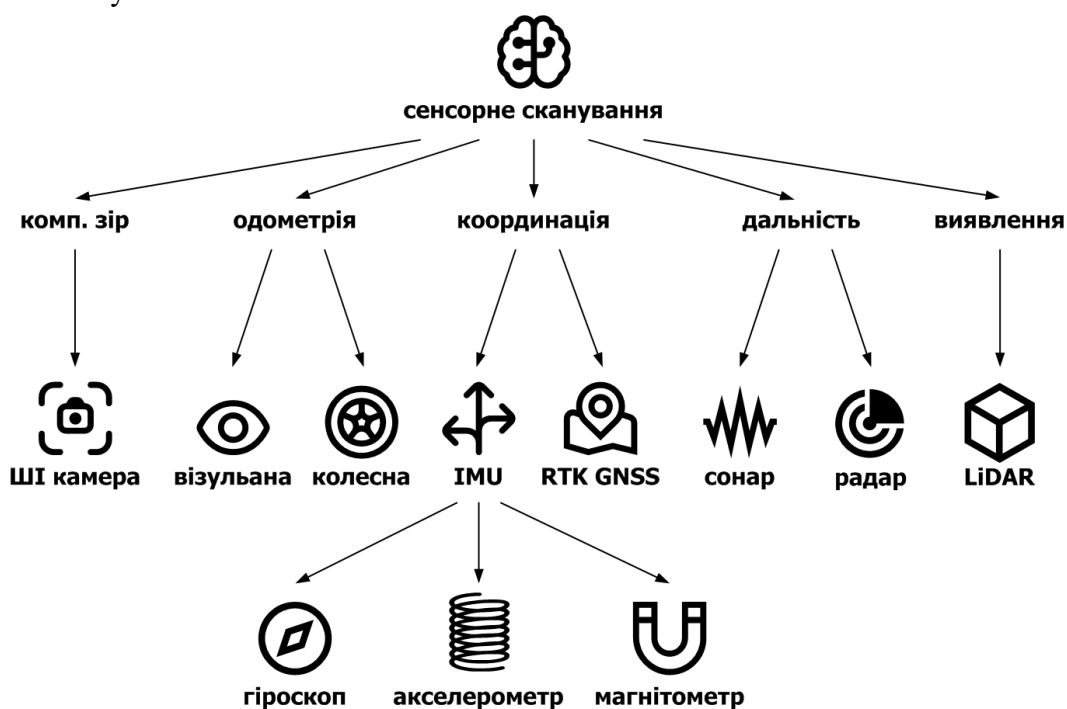


Рисунок 1 – Класифікація засобів сенсорного сканування у БТЗ

Пристрої (модулі) об'єднано в групи за функціональним призначенням, тому в одній групі можуть знаходитися датчики та сенсори кардинально різні за принципом дії.

Системи комп'ютерного зору (CV) в БТЗ використовують розумні камери для сприйняття навколишнього середовища. Камери застосовуються для виявлення, розпізнавання та відстеження об'єктів.

Колісна та візуальна одометрія – це методи вимірювання переміщення та оцінки положення БТЗ. Колісна одометрія ґрунтується на даних від приводу двигуна про обертання коліс БТЗ. Цей метод підходить тільки для колісної техніки і вразливий до помилок через фактори ковзання, зносу шин, нерівності дороги тощо. Візуальна одометрія використовує зображення

від стереокамер або всеспрямованих камер і застосовує на них CV-алгоритми. Система порівнює послідовні зображення з довкіллям і визначає, наскільки змістився об'єкт.

Координата базується на розрахунку просторових координат для визначення місцезнаходження БТЗ. Використовується поєднання двох систем позиціонування: інерційна навігаційна система INS (inertial navigation system) та супутникова система навігації GNSS (global navigation satellite system). Супутникова система надає абсолютні координати, які використовуються як початкова точка відліку для інерційної системи. Система INS використовує дані про обертання та прискорення, отримані від інерційного вимірювального модуля IMU (inertial measurement unit) для визначення зміни відносного положення об'єкта.

Під дальністю мається на увазі визначення відстані до найближчого об'єкта. Група представлена радаром і сонаром, обидва пристрої основані на методі виявлення відбиття генерованого сигналу. Радар використовує радіохвилі, а сонар – акустику. Дані, що надаються радаром і сонаром, майже не вимагають обробки і можуть надходити безпосередньо в контролер керування, що дозволяє БТЗ екстрено реагувати при небезпеці зіткнення з об'єктом [3].

Виявлення представлено багатофункціональним інструментом – LiDAR (light identification, detection and ranging). Технологія дозволяє виміряти відстань до об'єкта шляхом опромінення його лазерним імпульсом. Лідар вимірює час, за який відбитий від об'єкта імпульс повертається назад до приймача лідару. Завдяки тому, що швидкість світла є сталою величиною, це дозволяє розрахувати відстань з дуже високою точністю. Циклічне повторення цього процесу у просторі створює цифрову 3D карту навколо БТЗ.

На основі аналізу доступних джерел [3–5] сформовано узагальнену структуру системи керування БТЗ. Представлена архітектура передбачає програмну реалізацію. Вона включає у себе сім підсистем (див. рис. 2).

З метою мінімізації структури системи керування можливе об'єднання деяких підсистем близьких за призначенням та взаємодією між собою. Так, локалізація може бути включена у підсистему сприйняття, а підсистема навігації інтегрована у блок прогнозу руху.

Модуль сприйняття відповідає за виявлення об'єктів, які знаходяться у безпосередній близькості до БТЗ. Цей модуль ставить перед собою задачі з відстеження об'єктів, розпізнавання об'єктів, а також оцінки вільного простору. Відстеження об'єктів має на меті оцінку траєкторії об'єкта, що перебуває у русі. Після ідентифікації об'єкта методами розпізнавання, система автоматично спостерігає за поведінкою об'єкта. Цей процес має місце у моніторингу найближчих транспортних засобів, що рухаються, а також інших об'єктів та перешкод, з метою запобігання зіткнень з ними.

Блок локалізації визначає місцезнаходження та орієнтацію транспортного засобу відносно місцевості у режимі реального часу, що дозволяє йому приймати високоточні рішення в динамічному середовищі. Якщо частота оновлення даних локалізації буде надто низькою, то система буде вимушена рухатися з низькою швидкістю або навіть періодично зупинятися. Якщо ж локалізація буде недостатньо точною, то це підвищує ризик зіткнення із перешкодою, яка не була вчасно виявлена. Отже, щоб забезпечити для БТЗ максимально надійну локалізацію, необхідно застосувати всі наявні ресурси сенсорного сканування.

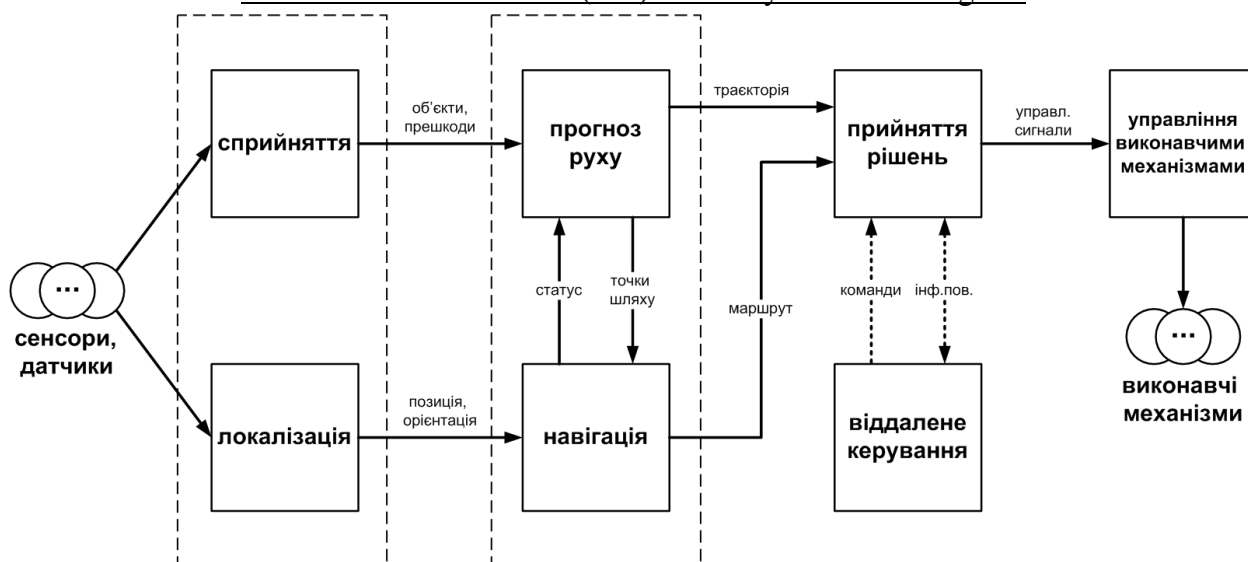


Рисунок 2 – Архітектура системи керування БТЗ

Блок прогнозу руху служить для прогнозування локального маршруту БТЗ при переміщенні з однієї точки шляху (так званий «check point») до наступної із врахуванням попередньо виявлених перешкод у блоці сприйняття. Даний процес є ітеративним, для прогнозування наступної ітерації необхідно отримати оновлений статус локалізації БТЗ у локальному просторі від підсистеми навігації. Для передбачення дій інших учасників руху використовується стохастична модель на базі наборів ймовірностей можливих положень [3].

Підсистема навігації призначена для формування глобального маршруту БТЗ, тобто від точки початку руху до пункту призначення, на основі отриманих даних від блоку локалізації (позиція та орієнтація). Порівнюються всі можливі маршрути, і на основі заданих критеріїв обирається найбільш оптимальний шлях. Це особливо важливо при можливості вибору альтернативної дороги в процесі пересування та в моменти зміни напрямку руху БТЗ. Також важливою функцією підсистеми навігації є точне визначення статусу положення БТЗ на трьохмірній HD мапі у векторному форматі, що необхідно для визначення локальної траєкторії БТЗ у підсистемі прогнозу руху.

Блок прийняття рішень приймає всі поведінкові рішення для керування підсистемою виконавчих механізмів. Поведінкові рішення можуть змінюватися або повністю надаватися підсистемою віддаленого керування, за наявності такої. Прогнозований трафік формується з врахуванням траєкторій найближчих до БТЗ учасників руху та безпосередньо траєкторії руху самого БТЗ, отриманих від блоку прогнозу руху, також використовується маршрут від блоку навігації. Система прогнозування трафіку генерує показники різного характеру, такі як час до зіткнення з об'єктом чи мінімальну відстань до нього. На основі цієї інформації активується механізм обходу перешкод, який проводить локальне перепланування шляху з метою запобігання зіткнень (перший рівень захисту).

Для забезпечення безпечного пересування БТЗ у блок прийняття рішень інтегровано другий рівень захисту під назвою система екстреного запобігання зіткнень, яка втручається у механізми керування у разі неспрацьовування модуля планування руху (вихід з ладу або виникнення непередбачуваної події). При виявленні раптової перешкоди, радар або сонар запускає екстрений механізм втручання у керування для запобігання зіткненню.

Блок віддаленого керування представляє собою комунікаційну систему зворотного зв'язку із БТЗ на основі пультаового телеуправління оператором. Оператор може застосовувати, як високорівневе, так і низькорівневе управління, або ж просто спостерігати за діями БТЗ у автоматичному режимі. Від пульта оператора відправляються команди у блок прийняття рішень, обидва блоки обмінюються інформаційними повідомленнями про статус БТЗ та виконання команд. Дана підсистема є не обов'язковою, якщо БТЗ є повністю автономним.

Підсистема управління виконавчими механізмами виконує безпосереднє управління електромеханічними органами БТЗ на основі отриманих управляючих сигналів від модуля прийняття рішень.

Основними апаратними компонентами системи є контролери високого та низького рівня (див. рис. 3). Контролер високого рівня призначений для прийому відео потоку і реалізації комп'ютерного зору. Для цієї задачі підійде потужний міні-комп'ютер (Raspberry Pi, Orange Pi, Odroid тощо). Контролером низького рівня, як правило, виступає мікроконтролерна платформа (Arduino, ESP32, STM32 тощо), призначена для роботизованного керування виконавчими механізмами.

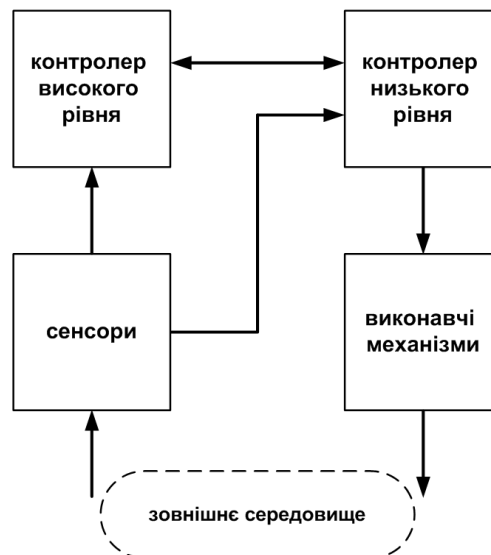


Рисунок 3 – Основні апаратні модулі для керування БТЗ

**Висновки.** В роботі розглянуті принципи побудови та організація систем керування БТЗ. Запропоновано класифікацію засобів сенсорного сканування у БТЗ. За результатами аналізу доступних джерел розроблено узагальнену структуру системи керування БТЗ, описано її окремі функціональні підсистеми та організацію обміну даними між ними. Визначено основні апаратні компоненти систем керування. Представлена архітектура може бути використана при створенні БТЗ.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. de Araújo V., Paula G. S. Almeida A., T. Miranda C., de Barros Vidal F. A Parallel Hierarchical Finite State Machine Approach to UAV Control for Search and Rescue Tasks. *Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 2: SciTePress*, p. 410-415. URL: <https://doi.org/10.5220/0005121104100415>

2. Balestrieri E., Daponte P., De Vito L., Lamonaca F.. Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview. *Sensors*. 2021; 21(4): 1518. URL: <https://doi.org/10.3390/s21041518>
3. Creating Autonomous Vehicle Systems, Second Edition / Shaoshan Liu, Liyun Li, Jie Tang, Shuang Wu, Jean-Luc Gaudiot. Morgan & Claypool Publishers, 2020. 216 p.
4. Lazna T, Gabrlik P, Jilek T, Zalud L. Cooperation between an unmanned aerial vehicle and an unmanned ground vehicle in highly accurate localization of gamma radiation hotspots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018. vol. 15(1). URL: <https://doi.org/10.1177/1729881417750787>
5. System for multi robotic exploration of underground environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge / T. Rouček and oth. *Field Robotics*. 2022. vol. 2. p.1779–1818. URL: <https://doi.org/10.55417/fr.2022055>

Received 03.05.2024.

Accepted 06.05.2024

### ***Principles of construction of control systems for unmanned vehicles***

*The work considers the principles of construction and organization of the control system of unmanned vehicles. Unmanned vehicles (UAVs) are a type of vehicles that move without a human pilot on board using a special autonomous control system. The key components of control systems include perception sensors, navigation subsystems and algorithms, data processing algorithms, localization algorithms, dynamic route planning algorithms, communication tools, etc. In the available sources, there are different visions of architectural solutions for UAV control systems. As a rule, such solutions depend on a specific set of sensors.*

*The purpose of the work is to develop the principles of building control systems for unmanned vehicles. Solved tasks: analysis of means of collecting information about the state and position of unmanned vehicles; development of a generalized architecture of the control system of unmanned vehicles.*

*A classification of sensor scanning tools is proposed. The following groups of sensor scanning modules have been defined: computer vision, odometry, coordination, range, detection. The generalized structure of the control system is developed, its separate functional subsystems are described. The presented architecture involves software implementation and includes seven subsystems: perception, localization, motion prediction, navigation, decision-making, remote control, control of executive mechanisms. In order to minimize the structure of the control system, it is possible to combine some subsystems that are similar in purpose and interaction with each other. So, localization can be included in the perception subsystem, and the navigation subsystem is integrated into the motion prediction unit. The main hardware components of the system are high-level and low-level controllers. The presented architecture can be used in the creation of unmanned vehicles.*

*Keywords: unmanned vehicle, control system, architecture, sensor, detector, controller.*

**Остапєць Ярослав Дєнісович** – магістр, кафедра «Електронні обчислювальні машини» Українського державного університету науки і технологій, ORCID: 0000-0003-1976-5188

**Ostapets Yaroslav** – master, «Electronic computers» department of Ukrainian State University of Science and Technologies, ORCID: 0000-0003-1976-5188