

А.Г. Ткачук, к.т.н., доц.
А.Р. Кравчук, доктор філософії
О.А. Черниш, к.філ.н., доц.
В.В. Воротніков, д.т.н., доц.
В.Ю. Ткачук, магістрант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Синтез універсальної системи автоматичного керування безпілотними апаратами різних типів на основі модульного підходу

У статті розглянуто проблему побудови універсальної системи автоматичного керування безпілотними апаратами різних типів, зокрема наземними, надводними та повітряними роботизованими платформами. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю уніфікації підходів до розроблення систем керування в умовах зростання різноманітності безпілотних засобів та їх широкого застосування у цивільних і військових задачах.

Запропоновано модульний підхід до синтезу системи автоматичного керування, який передбачає декомпозицію системи на функціональні підсистеми: модуль стабілізації, модуль навігації, модуль планування руху та модуль адаптації до зовнішніх впливів. Обґрунтовано можливість використання єдиної архітектури керування для різних типів безпілотних апаратів шляхом уніфікації інформаційних потоків і застосування параметризованих моделей динаміки.

Розглянуто особливості математичного опису динаміки безпілотних платформ різної фізичної природи та запропоновано узагальнену модель, що дозволяє реалізувати універсальні алгоритми керування. Проведено аналіз методів автоматичного керування, зокрема класичних (PID, LQR) та сучасних (адаптивних і робастних), з точки зору їх застосування в модульній структурі системи.

Особливу увагу приділено інтеграції сенсорної інформації (IMU, GPS, LiDAR, відеосенсори) для забезпечення точного оцінювання стану апарата та формування керуючих впливів у реальному часі. Запропоновано підхід до масштабування системи для використання в гетерогенних групах безпілотних апаратів.

Ключові слова: безпілотні апарати; системи автоматичного керування; модульна архітектура; адаптивне керування; робототехніка; сенсорна інтеграція.

Актуальність теми. Стрімкий розвиток безпілотних апаратів різної фізичної природи – наземних роботизованих платформ (колісних, гусеничних, крокуючих, повзаючих) надводних (підводних) апаратів і безпілотних літальних апаратів – формує нові вимоги до систем автоматичного керування, орієнтованих на автономність, надійність, адаптивність та інтегрованість у складні кіберфізичні середовища. У сучасних умовах такі системи активно застосовуються для моніторингу інфраструктури й довкілля, виконання пошуково-рятувальних робіт, логістичних операцій, інспекції енергетичних об'єктів, а також у завданнях безпеки та оборони. Розширення спектра застосувань призводить до ускладнення місій: апарати працюють у динамічних і невизначених умовах (нерівності рельєфу, змінне зчеплення, хвильові збурення, пориви вітру, обмеження зв'язку, завади сенсорів), що підвищує вимоги до якості керування.

Незважаючи на наявність значної кількості рішень у сфері автоматичного керування безпілотними апаратами, більшість існуючих підходів розробляються під окремий клас платформ і не забезпечують достатньої переносимості алгоритмів між різними типами апаратів. Така фрагментація ускладнює масштабування рішень, подовжує цикл розроблення та тестування, збільшує вартість впровадження і знижує сумісність апаратів у спільних місіях. Водночас сучасні тенденції робототехніки спрямовані на створення гетерогенних роботизованих комплексів, де взаємодіють повітряні, наземні та водні платформи, а ефективність досягається за рахунок узгодженого керування, уніфікованих протоколів обміну даними та спільного планування дій. У цьому контексті актуальним стає завдання синтезу універсальної системи автоматичного керування, яка дозволяє застосовувати спільні принципи побудови контурів керування для різних типів апаратів, адаптуючи їх до конкретної динаміки та умов середовища за рахунок параметризації та модульності.

Додаткову складність становить різниця у математичних моделях руху та обмеженнях керувальних впливів у різних класах безпілотних систем. Для наземних і крокуючих роботів важливими є питання кінематичних обмежень (ковзання, буксування, контакти), для надводних – гідродинамічні збурення і взаємодія з хвильовим профілем, для повітряних – аеродинаміка та швидкоплинні зовнішні впливи. Універсальна система керування має забезпечувати роботу в умовах параметричної невизначеності,

неповноти інформації, затримок у каналах зв'язку та змінних режимів руху, що потребує застосування сучасних методів робастного й адаптивного керування у поєднанні з точним оцінюванням стану.

Важливим аспектом є інтеграція інформації від різнорідних сенсорів (IMU, GNSS, камер, LiDAR/сонарів, далекомірів, датчиків контакту тощо), яка забезпечує формування надійних оцінок положення, швидкості, орієнтації та параметрів середовища. Саме сенсорна інтеграція, підтримана сучасними методами фільтрації та оцінювання, створює основу для побудови уніфікованої інформаційної моделі стану, спільної для різних платформ. У поєднанні з модульною архітектурою це дозволяє стандартизувати інтерфейси між підсистемами стабілізації, навігації, планування руху та виконання місії, підвищуючи повторне використання алгоритмів і спрощуючи верифікацію.

Таким чином, дослідження, спрямоване на розроблення універсальної модульної системи автоматичного керування безпілотними апаратами різних типів, є актуальним науково-практичним завданням. Його розв'язання забезпечує підґрунтя для підвищення адаптивності автономних роботизованих платформ, скорочення витрат на розроблення і впровадження, а також створення сумісних рішень для гетерогенних роботизованих комплексів.

Мета статті полягає в розробленні універсальної модульної системи автоматичного керування для безпілотних апаратів різних типів, здатної забезпечувати стійке та точне керування рухом в умовах параметричної невизначеності й зовнішніх збурень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що в галузі мобільної робототехніки відбувається перехід від «точкових» рішень для окремих класів безпілотних апаратів до уніфікованих (модульних) архітектур керування, які дозволяють повторно використовувати алгоритми стабілізації, навігації, планування руху та виконання місії у різних апаратних конфігураціях. У практичних реалізаціях і дослідницьких прототипах ключову роль відіграють робототехнічні middleware-рішення (ROS 2) та відкриті автопілотні стеки (PX4/ArduPilot), що спрощують інтеграцію датчиків, виконавчих механізмів і підсистем високого рівня. Зокрема, у роботах часто активно використовується зв'язка ROS 2 + PX4 як основа розподіленої структури «вузлів» керування та взаємодії компонентів [1].

Також науковцями активно проводяться дослідження за напрямом кооперативного керування гетерогенними групами роботів (наприклад, UAV+UGV у спільній місії). У роботах [2] системно узагальнено архітектурні підходи, механізми комунікації та кооперативні режими (розподіл задач, формації, уникнення перешкод, планування траєкторій і прийняття рішень). Додатково з'являються роботи, де мультидоменні рої/команди застосовуються для індустріального моніторингу й картографування, що підсилює практичний запит на уніфіковані контури керування і єдину систему координат для різних платформ.

Не менш важливим є блок досліджень із оцінювання стану та сенсорної інтеграції, оскільки універсальна архітектура керування для різних типів безпілотних апаратів потребує узгодженого стану (позиція, швидкість, орієнтація, похідні) незалежно від середовища руху (суходіл/вода/повітря). У [3] активно розвиваються підходи до злиття GNSS–LiDAR–IMU та інші багатосенсорні комбінації на основі варіантів помилкового та ітеративного Калманівського оцінювання, які демонструють високу точність при обмежених обчислювальних ресурсах.

Для крокуючих роботів, на відміну від колісних/надводних/літальних, критичною є задача динамічної стійкості та керування контактом, і саме тут в [4] підкреслено складність керування через змінність контактних умов, нерівності рельєфу та похибки.

У роботі [6] приведено приклад поєднання адаптивності та робастності (backstepping / sliding-mode підходи) для підвищення стійкості БПЛА за наявності випадкових збурень.

У статті [7–8] описано сучасний напрям «disturbance-aware» адаптації, а саме компенсація зовнішніх збурень у просторі моментів/зусиль, що добре переноситься на наземні роботизовані платформи (де контактні збурення критичні).

Викладення основного матеріалу. Сучасні мобільні роботизовані платформи характеризуються значною різноманітністю конструктивних рішень, принципів переміщення та середовищ експлуатації. Для задач синтезу універсальної системи автоматичного керування доцільно виконати класифікаційний і функціональний аналіз існуючих платформ за критеріями: 1) середовище руху, 2) тип рушія/локомоції, 3) рівень автономності, 4) сенсорне забезпечення та навігація, 5) структура виконавчих механізмів і обмеження керування, 6) домінуючі збурення. Узагальнення таких ознак дозволяє виділити інваріантні компоненти САК та платформозалежні модулі, що є ключовим для модульного підходу (рис. 1).

До класу літальних безпілотних платформ належать квадрокоптери, літакоподібні БПЛА, гелікоптери та гібридні схеми. Їх спільною особливістю є висока динамічність, залежність від аеродинамічних ефектів та жорсткі вимоги до стабілізації орієнтації. Для мультикоптерів критичними є контури кутової стабілізації (roll/pitch/yaw) та управління тягою, а керування реалізується у просторі з подальшим перетворенням у команди ESC/оберти двигунів (control allocation). Літакоподібні БПЛА використовують інший профіль керування: управління підйомною силою, тангажем, креном і курсом

здійснюється через кермові поверхні та тягу, що створює більш виражену залежність від режиму польоту та швидкості. Для гелікоптерів характерні складніші внутрішні зв'язки між каналами керування. Основними зовнішніми збуреннями для UAV є пориви вітру, турбулентність, зміна маси/центру мас (корисне навантаження), а також обмеження зв'язку й точності GNSS. Типовий набір датчиків включає IMU, барометр, GNSS, компас, камери, LiDAR/радар висоти. У контексті універсальної САК важливо, що незалежно від типу UAV, базовими залишаються модулі: оцінювання стану, каскадне керування та allocation.



Рис. 1. Класифікація мобільних роботизованих платформ

Наземні платформи представлені колісними, гусеничними, крокуючими роботами та системами на змішаній тязі. Для колісних і гусеничних UGV найбільш поширені кінематичні схеми: диференціальний привід, керовані колеса, омні-колеса. У таких системах керування часто зводиться до формування (v, ω) або (v, δ) (лінійна швидкість і кутова/кут керма), з подальшим відображенням на швидкості коліс/гусениць. Ключовими проблемами для UGV є ковзання, буксування, змінне тертя, нерівності рельєфу, що призводить до похибок у моделі та потребує робастних/адаптивних контурів, особливо при слідуванні траєкторії та автономній навігації.

Сенсорне забезпечення UGV зазвичай включає енкодери, IMU, GNSS (за можливості), LiDAR/камера для локалізації та уникнення перешкод, інколи – радар. В умовах відсутності GNSS критичним стає поєднання LiDAR/vision SLAM та інерціальних вимірювань. Для універсальної САК наземні платформи формують вимогу до наявності в архітектурі: 1) модулів для врахування контактних ефектів і оцінювання параметрів тертя, 2) гнучкого allocation, який працює з обмеженнями приводів і режимами руху.

Крокуючі роботи (бі-, квадро- та гексаподи) вирізняються наявністю фаз опори/переносу, складною контактною взаємодією та необхідністю забезпечення динамічної стійкості. На відміну від колісних UGV, для яких домінують кінематичні обмеження, для legged-платформ критичними є задачі керування центром мас, моментом відносно опорного полігону, регулювання контактних сил і синхронізація траєкторій суглобів. Керувальні впливи найчастіше реалізуються у просторі моментів у суглобах t_j або через бажані контактні сили з подальшим розв'язанням задачі розподілу (allocation) з урахуванням обмежень приводів і контактів. Збурення для крокуючих роботів мають імпульсний характер: удари при контакті, нерівності ґрунту, просідання, зміна коефіцієнтів зчеплення. Це вимагає високої частоти внутрішніх контурів і ефективної фільтрації стану (IMU, енкодери, датчики контакту, інколи – vision/LiDAR). Універсальна САК у цьому випадку повинна підтримувати спеціалізований модуль контактної логіки та розширені модулі allocation, але при цьому зберігає інваріантне ядро оцінювання та планування.

Надводні безпілотні платформи (безпілотні катери, плаваючі платформи) та підводні роботи характеризуються суттєвим впливом гідродинаміки. Для USV типова модель має 3 ступені вільності в площині (surge-sway-yaw), а керування реалізується через тягу рушіїв/гвинтів і момент курсу (F_x, M_z) . Основні збурення: хвилі, течія, вітер, інерційні ефекти, а також складність точного позиціонування. Сенсорний склад для USV/UUV часто включає IMU, GNSS (для надводних), компас, сонар (для підводних і надводних задач), доплерівські лаги, камери, інколи – гідроакустичні маяки. Обмеження керування пов'язані з інерційністю системи, затримками та нелінійністю тяги. Універсальна САК має враховувати: 1) спільний модуль оцінювання стану, що підтримує GNSS–IMU–сонарні конфігурації, 2) робастно-адаптивні методи компенсації хвильових / течійних збурень, 3) allocation для багато-рушійних схем.

Проведений аналіз показує, що попри відмінності у фізиці руху та конструкції, різні класи мобільних платформ мають спільний «каркас» керування, який може бути уніфікований:

– інваріантні модулі: оцінювання стану, планування траєкторії/місії, каскадні принципи керування, моніторинг і діагностика;

– залежні від платформи модулі: параметри моделі θ , обмеження приводів, специфіка виконання керування, контактна логіка та моделі збурень (вітер/хвиля/тертя).

Запропонована САК орієнтована на уніфікацію контурів керування для безпілотних апаратів різних класів. Універсальність досягається через модульну архітектуру із стандартизованими інтерфейсами даних і моделлю об'єкта керування з потрібними параметрами.

Узагальнена математична модель безпілотного апарата.

Для забезпечення перенесення алгоритмів використано узагальнену модель у просторі станів:

$$\dot{x} = f(x, u, \theta) + G(x)d(t), \quad y = h(t) + v(t),$$

де x – вектор стану (положення, швидкості, орієнтація, кутові швидкості тощо),

u – вектор керуючих впливів,

θ – вектор параметрів моделі (маса, інерція, гідро/аеро коефіцієнти, коефіцієнти тертя, геометрія опор/шасі),

$d(t)$ – зовнішні збурення (вітер, хвиля, нерівності, буксування, контактні імпульси),

$v(t)$ – шум вимірювання.

Для практичної реалізації модель подається у дискретній формі з кроком Δt :

$$x_{k+1} = f_d(x_k, u_k, \theta) + \omega_k, \quad y = h_k(x_k) + v_k,$$

де ω_k – еквівалент збурень і неврахованої динаміки.

Універсальна САК потребує узгодженого оцінювання стану для різних типів сенсорів. Використано розширений фільтр Калмана. Для різних платформ прийнято каскадну структуру, яка добре масштабується:

1. Зовнішній контур (позиція / траєкторія): формує бажані швидкості / прискорення;

2. Внутрішній контур (стабілізація / орієнтація / швидкість): реалізує керування виконавчими органами.

Такий підхід зручний тим, що верхній рівень можна зробити майже однаковим для різних платформ, а нижній рівень адаптувати під конкретну фізику апарата.

Зовнішній контур працює на рівні логіки руху: приймає ціль (точка, маршрут, план місії, зона пошуку, обхід перешкод), отримує оцінений стан від модуля сенсорної інтеграції (де апарат знаходиться, куди повернений, як рухається); формує команди-цілі для нижчого рівня (бажану швидкість руху вперед; бажаний курс/напрямок; бажану висоту (для UAV); бажану траєкторію центру мас або кроків).

Приклади, що виходять із зовнішнього контуру:

UGV (колісний робот): «їхати зі швидкістю X і повертати з інтенсивністю Y ».

USV (катер): «йти на курс Z із заданою швидкістю, компенсуючи течію/вітер».

UAV (дрон): «рухатися до точки з певною швидкістю й утримувати висоту».

Внутрішній контур отримує команди-цілі від зовнішнього рівня та: стабілізує рух у реальному часі; компенсує швидкі збурення; керує приводами (моторами, рулями, рушіями, суглобами); виконує розподіл керування між приводами (якщо їх декілька).

Приклади внутрішнього контуру:

UAV: стабілізація кутів / орієнтації та перетворення команд у оберти моторів.

UGV: регулювання швидкості коліс / гусениць та компенсація буксування.

USV: керування тягою рушіїв та стабілізація курсу при хвилях.

Каскадна структура є найкращою для універсальної САК з наступних причин:

1. Якщо додати нову платформу, то змінюємо переважно внутрішній рівень (під приводи та динаміку), а зовнішній лишається майже той самий.

2. Внутрішній контур швидко гасить збурення (вітер / хвиля / нерівності).

3. Між контурами можна задати єдиний інтерфейс команд.

4. Можна тестувати окремо планування (зовнішній контур) і стабілізацію (внутрішній контур).

Робастно-адаптивний модуль керування (уніфікований принцип).

У реальних умовах безпілотна платформа майже ніколи не рухається ідеально як то передбачено у моделі. Є 2 головні причини:

– зовнішні збурення – те, що діє на апарат ззовні (вітер, хвиля, течія, нерівності, просідання ґрунту, удар контакту, ковзання, буксування тощо);

– невизначеність параметрів – те, що всередині змінюється або неточно відоме (маса й центр мас через корисне навантаження, зміна тяги моторів, зміна коефіцієнта тертя шин, різна плавучість, відмінності між однаковими приводами, люфти, зношування тощо).

Робастно-адаптивний модуль створений саме для того, щоб робастно (стійко) витримувати збурення і похибки моделі, а також адаптивно підлаштовуватися до змін параметрів об'єкта та умов середовища, щоб точність керування не падала.

Робастність компенсує (зазвичай швидкі/непередбачувані речі): пориви вітру (UAV); хвиля та зміна течії (USV); удари і різкі контакти (крокуючі); короточасне ковзання / нерівність / яма (UGV).

Адаптація підлаштовує (зазвичай повільні/параметричні зміни): зміна маси та центру мас (UAV/UGV/USV); зношування шин/гусениць або зміна тертя поверхні (UGV); зміна ефективності рушіїв/гвинтів, опору води (USV).

Розглянемо **алгоритм робастно-адаптивного керування** (рис. 2):

1. Формування завдання (завдання цілей). На вході система отримує ціль $r(t)$: куди рухатися і як саме (позиція, траєкторія, курс, швидкість, висота тощо);
2. Отримання інформації про реальний стан (вимірювання). Платформа (UGV/USV/UAV) рухається в середовищі і формує результати вимірювання $y(t)$ від сенсорів: IMU, GNSS, LiDAR/камера, сонар, енкодери, датчики контакту тощо;
3. Сенсорна інтеграція. Оскільки сенсори можуть бути шумними, з затримками або періодичними втратами, сигнал $y(t)$ не використовують як таким. Він надходить у модуль сенсорної інтеграції, який: синхронізує дані сенсорів у часі, фільтрує шум, поєднує різні вимірювання в єдину оцінку. Результат – оцінений стан платформи (де вона, з якою швидкістю, у якій орієнтації): $\hat{x}(t)$;
4. Обчислення похибки керування (порівняння цілі з реальністю). Система порівнює що треба ($r(t)$) з тим, що є ($\hat{x}(t)$). У суматорі формується похибка $e(t)$ – наскільки платформа відхилилася від заданого руху. Ця похибка є ключовим сигналом для керування: чим більша похибка, тим сильніша має бути корекція;
5. Робастно-адаптивний модуль або формування керуючого впливу. Робастно-адаптивний модуль отримує: $r(t)$ (задана інформація), $e(t)$ (наскільки відхилилися), додаткові оцінки/сигнали. Всередині модуля керування будується як сума трьох компонентів: номінальний регулятор, робастна компенсація та адаптивна схема;
6. Формування підсумкового сигналу керування. На виході робастно-адаптивного модуля всі три частини підсумовуються і утворюють підсумковий сигнал керування $u(t)$, який подається на реальну платформу;
7. Реакція платформи і замикання зворотного зв'язку. Платформа виконує команду $u(t)$, її стан змінюється, сенсори знову знімають нові дані $y(t)$, і цикл повторюється. Таким чином система працює як замкнена система зі зворотним зв'язком.

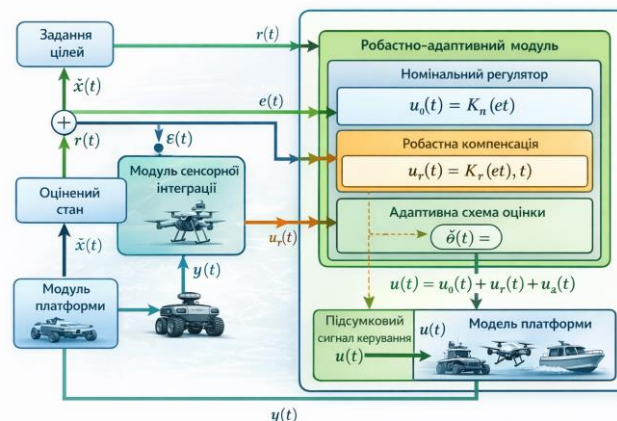


Рис. 2. Алгоритм робастно-адаптивного керування (рисунок створено з використанням ШІ)

Висновки та перспективи подальших досліджень. Обґрунтовано доцільність уніфікації підходів до автоматичного керування для безпілотних апаратів різних типів (UGV/USV/UAV) з огляду на зростання різноманіття мобільних роботизованих систем, їх інтеграцію в гетерогенні комплекси та підвищені вимоги до автономності, надійності й відтворюваності результатів керування в умовах невизначеностей. Запропоновано універсальну модульну архітектуру САК, що складається з інваріантного ядра (оцінювання стану, формування еталонів/траєкторії, каскадна організація контурів керування, робастно-адаптивна компенсація) та платформозалежних модулів (параметризація моделі, обмеження приводів, специфіка виконавчих механізмів і модуль узгодження керування). Такий поділ забезпечує масштабованість рішення та можливість повторного використання компонентів для різних класів апаратів. Розглянуто узагальнене математичне подання безпілотної платформи у просторі станів із урахуванням параметричної невизначеності та зовнішніх збурень, що дозволило сформулювати єдиний підхід до побудови контурів керування та оцінювання незалежно від середовища функціонування (суходіл/вода/повітря). Показано, що параметризований опис створює основу для перенесення алгоритмів між платформами за рахунок налаштування вектора параметрів.

Сформульовано каскадну структуру керування (зовнішній контур → внутрішній контур), яка забезпечує структурну сумісність підходів до керування різними платформами. Зовнішній контур формує еталонні параметри руху (позиція/траєкторія/курс/висота), а внутрішній забезпечує стабілізацію

та відпрацювання команд на рівні приводів. Такий підхід підвищує керованість, спрощує налаштування та дозволяє розділити задачі планування й стабілізації.

Розроблено робастно-адаптивний закон керування, який поєднує номінальний регулятор із робастною компенсацією збурень та адаптивним підлаштуванням параметрів. Показано, що цей підхід підвищує стійкість системи до збурень і забезпечує збереження точності при зміні параметрів об'єкта (маса, тертя, ефективність приводів, режим взаємодії з середовищем).

Список використаної літератури:

1. A Modular and Scalable System Architecture for Heterogeneous UAV Swarms Using ROS 2 and PX4-Autopilot / R.Pommeranz, K.Tebbe, R.Heynicke, G.Scholl // arXiv. – 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2510.27327.
2. PX4-Autopilot v1.16.0 Release Notes [Electronic resource]. – Access mode : <https://docs.px4.io/v1.16/en/releases/1.16>.
3. A survey on theories and applications for multi-robot cooperative hunting / J.Ni, Y.Zhao, Z.Zhang and other // Robotics and Autonomous Systems. – 2026. – Vol. 197. DOI: 10.1016/j.robot.2025.105296.
4. Multi-Domain Robot Swarm for Industrial Mapping and Asset Monitoring: Technical Challenges and Solutions / F.Ouerdane, A.Abubaker, M.B. Aremu and other // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 20. DOI: 10.3390/s25206295.
5. A fast and stable GNSS-LiDAR-inertial state estimator from coarse to fine by iterated error-state Kalman filter / J.Gao, J.Sha, Y.Wang and other // Robotics and Autonomous Systems. – 2024. – Vol. 175. DOI: 10.1016/j.robot.2024.104675.
6. Robust adaptive control law design for enhanced stability of agriculture UAV used for pesticide spraying / S.Ijaz, Y.Shi, Y.A. Khan and other // Aerospace Science and Technology. – 2024. – Vol. 155, Part 2. DOI: 10.1016/j.ast.2024.109676.
7. Robust H-Infinity Dual Cascade MPC-Based Attitude Control Study of a Quadcopter UAV / N.Hui, Y.Guo, X.Han, B.Wu // Actuators. – 2024. – Vol. 13, № 10. DOI: 10.3390/act13100392.
8. Disturbance-Aware Adaptive Compensation in Hybrid Force-Position Locomotion Policy for Legged Robots / Y.Zhang, B.Nie, Z.Cao and other // arXiv. – 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.00472.
9. Автоматизована система діагностики високовольтних електричних мереж на основі БПЛІА та технічного зору / А.Р. Кравчук, А.Г. Ткачук, А.А. Гуменюк та інші // Наукові праці ДонНТУ. Серія : «Електротехніка і енергетика». – 2025. – №2 (33). – С. 82–91.
10. Аналіз методів автономної навігації БПЛІА в умовах відсутності GPS-сигналу / А.Р.Кравчук, А.Г.Ткачук, О.О. Добржанський та інші // Науковий журнал «Технічна інженерія», 2025. – №1 (95). – С. 235–242.

References:

1. Pommeranz R., Tebbe K., Heynicke R. and Scholl G. (2025), «A Modular and Scalable System Architecture for Heterogeneous UAV Swarms Using ROS 2 and PX4-Autopilot», *arXiv*, doi: 10.48550/arXiv.2510.27327.
2. *PX4-Autopilot v1.16.0 Release Notes*, [Online], available at: <https://docs.px4.io/v1.16/en/releases/1.16>
3. Ni, J., Zhao, Y., Zhang Z. et al. (2026), «A survey on theories and applications for multi-robot cooperative hunting», *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 197, doi: 10.1016/j.robot.2025.105296.
4. Ouerdane F., Abubaker A., Aremu M.B. et al. (2025), «Multi-Domain Robot Swarm for Industrial Mapping and Asset Monitoring: Technical Challenges and Solutions», *Sensors*, Vol. 25, No. 20, doi: 10.3390/s25206295.
5. Gao J., Sha J., Wang Y. et al. (2024), «A fast and stable GNSS-LiDAR-inertial state estimator from coarse to fine by iterated error-state Kalman filter», *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 175, doi: 10.1016/j.robot.2024.104675.
6. Ijaz S., Shi Y., Khan Y.A. et al. (2024), «Robust adaptive control law design for enhanced stability of agriculture UAV used for pesticide spraying», *Aerospace Science and Technology*, Vol. 155, Part 2, doi: 10.1016/j.ast.2024.109676.
7. Hui, N., Guo, Y., Han, X. and Wu B. (2024), «Robust H-Infinity Dual Cascade MPC-Based Attitude Control Study of a Quadcopter UAV», *Actuators*, Vol. 13, No. 10, doi: 10.3390/act13100392.
8. Zhang, Y., Nie, B., Cao, Z. et al. (2025), «Disturbance-Aware Adaptive Compensation in Hybrid Force-Position Locomotion Policy for Legged Robots», *arXiv*, doi: 10.48550/arXiv.2506.00472.
9. Kravchuk, A.R., Tkachuk, A.H., Humeniuk A.A. et al. (2025), «Avtomatyzovana systema diahnostyky vysokovoltnykh elektrychnykh merezh na osnovi BPLA ta tekhnichnoho zoru», *Naukovi pratsi DonNTU. Seriiia. «Elektrotekhnika i enerhetyka»*, No.2 (33), pp. 82–91.
10. Kravchuk, A.R., Tkachuk, A.H., Dobrzhanskyi, O.O. et al. (2025), «Analiz metodiv avtonomnoi navihatsii BPLA v umovakh vidsutnosti GPS-syhnalu», *Naukovyi zhurnal «Tekhnichna inzheneriia»*, No.1 (95), pp. 235–242.

Ткачук Андрій Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2466-6299>.

Наукові інтереси:

- автоматизовані електроприводи;
- енергоефективність та енергозбереження мехатронних систем;
- мобільні роботизовані платформи;
- системи стабілізації озброєння.

Кравчук Антон Романович – доктор філософії, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8305-2492>.

Наукові інтереси:

- промислова та мобільна робототехніка;
- САПР;
- вбудовані системи.

Черниш Оксана Андріївна – кандидат філологічних наук, доцент, Проректор з науково-педагогічної роботи, розвитку людського капіталу та соціального лідерства університету Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-2010-200X>.

Наукові інтереси:

- комп'ютерна лексикографія;
- комп'ютерна, корпусна та структурна лінгвістики;
- медіалінгвістика.

Воротніков Володимир Володимирович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-8584-3901>.

Наукові інтереси:

- комп'ютерні мережі та мережні технології;
- мережна безпека, кібербезпека;
- керування складними інформаційними системами.

Ткачук Вероніка Юріївна – магістрантка групи АТ-31м спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

Наукові інтереси:

- мобільна робототехніка;
- автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи на базі БпЛА.

Tkachuk A.H., Kravchuk A.R., Chernysh O.A., Vorotnikov V.V., Tkachuk V.Yu.

Synthesis of a universal automatic control system for different types of unmanned vehicles based on a modular approach

The paper addresses the scientific and practical challenge of designing a universal automatic control system for different types of unmanned vehicles, including ground, surface, and aerial robotic platforms. The relevance of the study is driven by the need to unify control-system design approaches amid the rapid growth of unmanned platform diversity, increasing mission complexity, and the demand for integrating heterogeneous vehicles into joint civil and defense operations. Existing solutions are largely tailored to narrow platform classes, which complicates scalability, algorithm reuse, and interoperability of hardware–software components.

A modular approach to the synthesis of a universal automatic control system is proposed, based on decomposing the system into functional subsystems with formalized interfaces: a state-estimation and sensor-fusion module, a stabilization and motion-control module, a navigation module, a motion/trajectory planning module, and an adaptation and robust disturbance-compensation module. The feasibility of employing a unified control architecture across platforms with different physical natures is substantiated through the unification of information flows, the parameterization of dynamic models, and the use of generalized control-quality criteria.

The paper discusses key features of modeling unmanned platforms operating in different environments (land/water/air) and introduces a generalized state-space representation that accounts for parametric uncertainties and external disturbances. Classical control methods (PID, LQR) and advanced approaches (robust and adaptive control) are analyzed in terms of their suitability for modular architectures, transferability across platforms, and disturbance rejection capabilities. Special attention is devoted to multi-sensor integration (IMU, GNSS/GPS, LiDAR, vision sensors) to provide reliable real-time state estimates, which form the foundation for closed-loop control and navigation.

An approach to scaling the proposed system to heterogeneous groups of unmanned vehicles is outlined by standardizing inter-module data exchange, harmonizing control-layer interactions, and supporting diverse actuation mechanisms via control mapping/allocation procedures. The presented results establish a basis for developing universal intelligent control systems for autonomous robotic platforms and can be applied in research as well as in master's-level education within specialty «Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics».

Keywords: unmanned vehicles; automatic control systems; modular architecture; adaptive control; robotics; sensor fusion.

Стаття надійшла до редакції 09.01.2026.