УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2026.03.070

О. А. ФОКОВ[1], https://orcid.org/0000-0003-2934-7270
Д. С. СВОРОБІН[1], https://orcid.org/0000-0002-9856-8619
Д. А. РЕЗЦЯ[2], https://orcid.org/0009-0003-6945-0878

СТАН ТА ПРОБЛЕМНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯ РОЙОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ВІДНОСНИМ РУХОМ ОБ'ЄКТІВ ОРБІТАЛЬНОГО СЕРВІСУ

[1]*Інститут технічної механіки*
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, м. Дніпро, 49005, Україна, https://ror.org/003ed9546; e-mail: oafokov@gmail.com
[2]*Запорізький національний університет,*
вул. Університетська, 66, м. Запоріжжя, 69011, Україна, https://ror.org/04qst5w65

У сучасній космонавтиці поряд з традиційним підходом до виконання місій, що базується на використанні монолітних апаратів, намічається використання підходу на основі застосування ройових космічних систем. Цей підхід передбачає використання простіших, дешевих роботизованих апаратів (агентів), які колективно працюють щодо вирішення задачі. Переваги ройової технології полягають у гнучкості ройових систем, їх адаптивності до різних ситуацій. Разом з тим відмічається недостатня розробленість підходів до розгортання й керування групою агентів (наприклад, наносупутників). З іншого боку проводяться дослідження, пов'язані з вдосконаленням методів визначення параметрів відносного руху об'єктів орбітального сервісу, особливо некооперованих та/або невідомих, та методів керування їх рухом. Це обумовлено тим, що виконанню сервісної операції, як правило, передує погашення кутового відносного руху об'єкта. У низці робіт відмічається, що рої апаратів мають критичне значення для задач обслуговування на орбіті.

Метою роботи є визначення стану досліджень з використання ройової технології для керування відносним рухом об'єктів орбітального сервісу, визначення проблемних задач реалізації ройової технології, у тому числі, для вирішення яких може бути використаний досвід проведених в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України попередніх досліджень. Наведено огляд публікацій, присвячених проблемі застосування ройової технології в космічних місіях. На основі аналізу публікацій виділено етапи вирішення задачі керування рухом об'єкта орбітального сервісу із використанням ройової технології, визначено рівень вирішення задач для кожного з таких етапів: інкапсуляції, захоплення, ідентифікації інерційних параметрів та параметрів руху, керування відносним рухом. Визначено проблемні задачі реалізації ройової технології для керування рухом об'єкта сервісу та намічено шляхи вирішення проблемних питань.

Стратегія поведінки рою на етапі захоплення виглядає найменш дослідженою. Підхід, що спирається на закони поведінки природних систем, на відміну від етапу інкапсуляції, на цьому етапі не є цілком прийнятним, як складний у реалізації та такий, що не забезпечує мінімізацію витрат енергоресурсів. На думку авторів, підхід має бути доповнений підходом, що спирається на принципи рухомого керування, як такого, що може забезпечити почергове кріплення агентів на об'єкті сервісу до найближчої, у певний підходящий час, точки кріплення.

Практичне значення роботи полягає у визначенні проблемних питань з використання ройової технології для керування відносним рухом об'єктів орбітального сервісу, що сприятиме їх подальшому вирішенню.

Ключові слова: *ройові технології, керування відносним рухом, орбітальний сервіс, некооперований об'єкт сервісу.*

In modern astronautics, alongside with the traditional mission paradigm based on monolithic spacecraft, an alternative approach utilizing swarm space systems is emerging. This approach employs simpler, low-cost robotic spacecraft (agents) that work collectively to accomplish the mission objectives. The primary advantages of swarm technologies include system flexibility and adaptability to a wide range of operational scenarios. However, approaches to the deployment and control of such multi-agent groups (e.g., nanosatellites) remain insufficiently developed. On the other hand, research is underway on improving relative motion estimation and control methods for on-orbit service targets, especially uncooperative and/or unknown ones and methods to control their motion. This is due to the fact that a service operation should usually be preceded by damping the target's relative angular motion. Several studies have highlighted the critical role of spacecraft swarms in on-orbit service applications.

The goal of this study is to analyze the state of the art in research on the use of swarm technology to control the relative motion of on-orbit service targets and identify challenges in swarm technology implementation, including those that can be resolved using previous studies conducted at the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine. Publications on the use of

© О. А. Фоков, Д. С. Своробін, Д. А. Резця, 2026

The article is an open access article distributed underthe terms and conditions of the Creative Commons Attributions (CC BY) license (https/creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

swarm technology in space missions are overviewed. Based thereon, the study identifies stages of the problem of on-orbit service target motion control using swarm systems and assesses the problem resolution degree at each stage: encapsulation, capture, inertial and motion parameter identification, and relative motion control. The main challenges in swarm-based target control are identified, and ways to resolve them are outlined.

Swarm behavior at the capture stage seems to be least investigated. Unlike the encapsulation stage, the approach based on the behavior of natural systems is not fully suitable for capture due to its implementation complexity and inability to minimize energy consumption. In the authors' opinion, the approach should be extended to include time-shared control principles, thus allowing the agents to attach to the target one by one, each to the nearest attachment point at an appropriate time.

The practical significance of this study lies in identifying the key challenges in the use of swarm technology for relative motion control in on-orbit service, thus furthering their resolution.

Keywords: *swarm technologies, relative motion control, on-orbit service, uncooperative service target*.

Вступ. Традиційний підхід до виконання місій у сучасній космонавтиці базується на використанні монолітних апаратів. Паралельно з цим для виконання місій намічається використання роїв космічних апаратів. Так у роботі [1], де наведено огляд ройової технології для обслуговування космічних апаратів на орбіті, відмічається, що важливою сферою розвитку космонавтики є роботизовані технології, використання яких розширює можливості орбітального сервісу, у тому числі складання на орбіті та активного видалення космічного сміття. У цьому контексті прагнуть поступово й плавно замінити або доповнити процес розробки складних, високотехнологічних космічних апаратів, призначених для виконання певних завдань використанням кількох простіших, дешевших, але оснащених інтелектуальними методами керування роботизованих апаратів, які незалежно, але колективно працюють для досягнення спільних цілей. Ця ідея натхненна роями біологічних живих істот (комах, птахів, риб тощо), які існують у природі і демонструють спільну, майже суспільну, індивідуальну поведінку. Рій космічних апаратів (агентів) відрізняється від орбітального угруповання, тобто множини супутників, які спільно виконують одну задачу, вищим рівнем автономності та децентралізації. У якості агентів рою найчастіше розглядають малі супутники (масою до 500 кг) – міні-, мікро-, наносупутники. Переваги ройових технологій полягають у гнучкості ройових систем, їх адаптивності до різних ситуацій та задач.

З іншого боку проводяться дослідження, пов'язані з вдосконаленням методів визначення параметрів відносного руху некооперованих та/або невідомих об'єктів орбітального сервісу, та методів керування їх рухом. Це обумовлено тим, що виконанню сервісної операції, як правило, передує погашення відносного кутового руху об'єкта. Передбачається, що використання ройової технології дозволить більш точно визначати параметри руху об'єкта сервісу, особливо з невідомою формою, та спростить задачу керування його рухом.

Відома близька за змістом до ройової технології концепція керування рухом об'єкта орбітального сервісу за допомогою стільникового космічного робота, який складається з окремих функціональних блоків – актуаторних, сенсорних, обчислювальних тощо, які монтуються або закріплюються на об'єкті сервісу [2], [3]. У попередні роки в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України було розглянуто задачі в деякій мірі близькі або пов'язані з задачами використання ройової технології для керування відносним рухом об'єктів орбітального сервісу. Так спираючись на концепцію стільникового космічного робота, а також на концепцію двоступінчастої схеми [4] захоплення об'єкта було запропоновано концепцію стільникової архітектури до побудови автономної системи уповільнення обертового руху некооперованого об'єкта орбітального сервісу [5]. Було розроблено алгоритми функціонування системи,

а саме алгоритми визначення параметрів кутового руху, положення центра мас та потрібних керуючих впливів. Питання вибору місць кріплення та способів кріплення функціональних блоків не розглядалися. Було також досліджено [6] задачу визначення параметрів відносного руху об’єкта орбітального сервісу з невідомою формою поверхні. Було розроблено метод визначення параметрів зміни його відносного просторового положення на основі отриманих лідаром хмар точок поверхні цілі та надано рекомендації щодо застосування алгоритму методу для побудови процедури оцінювання руху об'єкта.

Мета роботи полягає у визначенні стану досліджень з використання ройової технології для керування відносним рухом об’єктів орбітального сервісу, у визначенні проблемних задач реалізації ройової технології, у тому числі, для вирішення яких може бути використаний досвід проведених в інституті попередніх досліджень.

Для досягнення мети роботи був проведений огляд і аналіз публікацій, присвячених дослідженням із застосування ройової технології для виконання задач орбітального сервісу. Аналіз публікацій дозволяє виділити після розгортання рою такі етапи виконання завдання керування відносним рухом об’єктів орбітального сервісу з використанням ройової технології. А саме:

– перший етап – інкапсуляція, тобто оточення та самоорганізація агентів рою навколо цілі;

– другий етап – захоплення об’єкта агентами з метою подальшого керування рухом, тобто посадка агентів або їх кріплення на поверхні об’єкта;

– третій етап – ідентифікація інерційних параметрів та параметрів руху об’єкта;

– четвертий етап – керування відносним рухом об’єкта.

Щодо архітектури керування роєм космічних апаратів. У роботі [7] наведено огляд досліджень, що стосуються колективного планування (collective planning) в космосі, перелічено кілька підходів та підсумовано, що в роботі [8] узагальнено характеристики п'яти основних архітектур керування польотною формацією (formation flying) й показано, що підхід, заснований на поведінці, є простим і ефективним для застосування в ройових системах, особливо для випадку великої кількості супутників (агентів).

У [8] під польотною формацією розуміється сукупність космічних апаратів, у яких будь-який з динамічних станів космічного апарата пов'язаний спільним законом керування, на відміну від поняття сузір’я (constellation), під яким розуміється сукупність космічних апаратів, стани яких жодним чином динамічно не пов'язані (тобто зміна стану одного космічного апарата не впливає на стан іншого). Поведінкова стратегія розглядається як така, що забезпечує уникнення зіткнень, або рух космічного апарата (агента) до цілі тощо. Теоретичне обґрунтування та реалізація (щодо децентралізованого керування безпілотними системами) поведінкової стратегії через введення штучних потенційних полів детально описані в роботі [9]. Відмічається, що багато досліджень в галузі ройових систем мотивовані емерджентною та самоорганізованою поведінкою в природі. Використовуючи концепцію архітектури поведінкового керування, натхненну природою, можна розробити систему керування, яка має переваги масштабованої, надійної та гнучкої системи.

Далі наведено короткий огляд досліджень відповідно до визначених етапів виконання завдання керування відносним рухом об’єктів орбітального сервісу.

Етап 1: інкапсуляція або оточення об’єкта агентами, що розгортаються з сервісного космічного апарата (КА). Задачі етапу:

– оточення об’єкта агентами рою та їх самоорганізація;

– попередня оцінка параметрів руху, інерційних параметрів та визначення геометрії поверхні об’єкта.

У статті [10] розглянуто проблему захоплення цільового об'єкта за допомогою рою космічних апаратів. Досліджено дві окремі фази процесу захоплення: фазу інкапсуляції та фазу захоплення. Автори спираються на фундаментальні моделі поведінки формації космічних апаратів, сформульовані у роботі [11], де поведінка окремого космічного апарата формується як результат локального відштовхування, тяжіння та вирівнювання. Основні правила поведінки агента підсумовуються як намагання постійно підтримувати безпечну дистанцію між ним та іншими агентами (відштовхування, уникнення зіткнення), уникати відхід з формації (тяжіння до віддалених агентів) та підтримувати узгоджене розташування агентів у формації (маневр вирівнювання із сусідами). Четверте правило поведінки залежить від конкретного завдання, яке потрібно виконати й може бути введено відповідно до конкретної місії. У роботі [11] показано, що за умови правильного налаштування параметрів керування результативна колективна поведінка може задовольняти виконанню місії ефективніше та автономніше, ніж традиційне централізоване керування. За методологією [10] на фазі інкапсуляції рій наближається до цільового об'єкта, для спостереження за його поверхнею та виявлення особливостей поверхні й потенційних точок контакту. Метою інкапсуляції є оточення цілі та розподіл агентів рою для оптимального покриття поверхні об’єкта. Керування рухом агентів спрямовано на їх перебування в безпосередній близькості від виявлених поверхневих особливостей та рівномірний розподіл агентів навколо цілі. Для досягнення такого колективного маневру виявлені особливості розглядаються як віртуальні агенти. В алгоритм керування рухом агента вводяться штучні потенційні поля: тяжіння до віртуальних агентів та відштовхування між сусідніми агентами.

У роботі [12] розроблено повністю децентралізовану, керовану подіями та біоінспірованою поведінкою структуру керування для роїв космічних апаратів, що працюють навколо невідомих, некооперованих цілей. Під подіями розуміються прояви фактів: виявлення цілі; приймання інформації про виявлення цілі від інших агентів; отримання надійної оцінки положення та геометричних характеристик цілі. В залежності від події працює певний алгоритм руху та функціонування агента. Така структура керування має забезпечити мінімально можливі витрати енергоресурсу агентів. Автори виділяють такі фази захоплення: пошук цілі, переслідування, буферизація цілі, стиковка. Захисна буферна зона навколо передбачуваної межі цілі вводиться, оскільки ціль є невідомою та некооперованою й агенти не мають попередніх знань про її фізичні характеристики й не можуть визначити сили відштовхування від об’єкта.

У роботі [13] досліджується проблема автономного утримування формації великих роїв мікро та наносупутників в умовах суворих обмежень щодо обчислювальних ресурсів, точності сенсорів та можливостей виконавчих механізмів. Розглянуто три алгоритми взаємодії: відштовхування від най-ближчих сусідів (запобігання зіткненню); вирівнювання (регулювання геометрії формації); тяжіння до віддалених сусідів (запобігання виходу із зони

видимості). У межах вирівнювання основними завданнями є придушення відносного дрейфу та підтримка досить великої відстані між супутниками для запобігання зіткнень, але досить малої для забезпечення постійної взаємної видимості. При обробці зображень використовується спрощений метод аналізу – blob analysis (аналіз «плям»), який дозволяє визначити параметри відносного руху без складних обчислень. У роботі продемонстровано, що поєднання поведінкових стратегій із мінімалістичним сенсорним рішенням є перспективним шляхом до створення повністю автономних угруповань. Формування законів керування рухом агентів відбувається з використанням моделей відносного руху супутників. Рух одного космічного апарата відносно іншого параметризується за допомогою безрозмірних орбітальних елементів, визначених у роботі [14], де відносне положення представляється вектором різниці середніх орбітальних елементів апаратів (нелінійні комбінації середніх кеплерових елементів). Тобто, алгоритми визначення керуючих дій включають в себе компоненти вектора різниці середніх орбітальних елементів. Ці параметри враховують геометрію та довгострокову еволюцію відносної траєкторії, тим самим дозволяючи приймати прогнозні рішення та вживати коригувальних заходів до того, як виникнуть небезпечні або небажані конфігурації.

Стаття [7] присвячена розробці та аналізу стратегій децентралізованого планування траєкторій для рою супутників із застосуванням міжсупутникової електромагнітної взаємодії, обумовленої магнітними моментами супутників. Актуальність дослідження обґрунтовується значними перевагами використання електромагнітної взаємодії, такими як відсутність витрат палива, виключення забруднення оптичних приладів факелами двигунів та висока точність керування. Бажана геометрія формації пов'язується з точками рівноваги попередньо розробленого (тобто, штучного) кінематичного поля. Бажана швидкість кожного супутника рою визначається як зважена сума кількох поведінкових компонентів: зближення, підготовки до стикування та уникнення зіткнень. Задача планування траєкторії переводиться в задачу оптимізації параметрів кінематичного поля за умови мінімізації споживання електроенергії та з урахуванням динаміки рою з міжсупутниковою електромагнітною силою. Аналіз та порівняння ефективності планування траєкторій проведено як за умови використання виключно електромагнітних сил (як внутрішніх сил системи), так і за гібридної схеми, з використанням традиційних реактивних двигунів. Найбільш перспективним визначено гібридний підхід. У такій моделі електромагнітні сили виконують основну роботу, а двигуни компенсують різницю між необхідною силою керування та фізичними можливостями електромагнітної взаємодії.

У роботі [15] досліджено стратегію самоорганізуючого керування для інтелектуального рою, призначеного для дослідження астероїдів. Автори пропонують використання моделі лідер-ведені (leader-followers), де один КА виступає лідером, що виконує планування траєкторії навколо цільового об’єкта, а інші слідують за ним, використовуючи стратегію самоорганізації. Керування веденими апаратами базується на штучних потенційних полях тяжіння та відштовхування. Це дозволяє рою підтримувати задану безпечну відстань та автоматично формувати стабільну геометричну конфігурацію без необхідності глобальної координації. Наведено математичний опис функцій штучних потенційних полів та механізму планування і відстеження швидкості агентів для підтримання стабільної конфігурації рою.

Оцінка параметрів руху, інерційних параметрів та визначення геометрії поверхні об’єкта є важливою складовою першого етапу виконання завдання керування відносним рухом об’єктів орбітального сервісу. Стосовно терміну попередня оцінка. По відношенню до оцінки руху та інерційних параметрів тут мається на увазі проведення дистанційної оцінки на відміну від оцінки цих параметрів після завершення процесу механічного контакту з об’єктом. У роботі [16] систематизовано результати публікацій щодо методів орбітального дистанційного визначення параметрів об’єктів орбітального сервісу і параметрів їх руху. Зокрема, у роботі [17] представлено архітектуру для оцінки динамічного стану, геометричної форми та інерційних параметрів об'єктів на орбіті з використанням кооперативних 3D-датчиків зору на орбіті. Для підтвердження працездатності запропонованої архітектури було проведено числові експерименти, при яких датчики були рівномірно розподілені в просторі навколо цілі. Ця архітектура може бути використана при визначенні параметрів об’єкта за допомогою рою агентів, якщо припустити, що на них розташовані відповідні датчики. Серед алгоритмів оцінювання параметрів об’єктів орбітального сервісу найбільш часте використання отримали алгоритми на основі фільтрів Калмана різної модифікації. При виборі моделі руху об’єкта сервісу в більшості випадків нехтують орбітальним рухом сервісного космічного апарата і об’єкта, разом з тим є тенденція врахування їх орбітального руху.

Як показано у [18], для випадку відсутності зовнішнього моменту матриця тензора інерції спостерігається лише з точністю до масштабного коефіцієнта. Традиційно відношення моментів інерції уводяться безпосередньо до оцінюваного вектору стану об’єкта. Оригінальний метод оцінювання головних осей та відношень моментів інерції пасивного об'єкта запропоновано в роботі [19], де оцінювання відбувається побудовою полодій об'єкта. Полодії, в свою чергу, оцінюється за допомогою відеозасобів. Оцінка головних осей виконується шляхом знаходження такої орієнтації системи координат тіла, при якій еліпси та гіперболи оптимально апроксимують проєкції полодії на площини головних осей.

У роботі [20] зауважено, що надійний метод оцінки положення невідомої та непрацюючої космічної цілі за допомогою монокулярного зору залишається відкритою проблемою. В роботі запропоновано концепцію алгоритму M-SEPS (Multi-Spacecraft Simultaneous Estimation of Pose and Shape algoritm) для спільної оцінки просторового положення невідомої цілі командою космічних апаратів-переслідувачів. Кожен з апаратів, оснащений монокулярною камерою, обмінюється інформацією через локальну мережу. Кожен апарат паралельно оброблює свої зображення та витягує власний набір ключових точок поверхні цілі. Потім команда використовує локальну мережу для спільної розподіленої оцінки положення та форми цілі. Автори припускають, що це перший алгоритм на основі кооперативного бачення для оцінки просторового положення та форми космічного об’єкта за допомогою довільної кількості космічних апаратів.

У роботі [21] було відзначено, що визначення параметрів положення та інерційних параметрів некооперованої цілі є важливим у місії з орбітального обслуговування та запропоновано метод визначення параметрів цілі шляхом послідовної реєстрації хмар точок, знятих камерою глибини. Результат апаратного експерименту на основі роботизованої руки для імітації тривісного обертання та збору хмари точок показує, що запропонований метод ефективно

ідентифікує інерційні параметри, включаючи нормалізовані головні моменти інерції та орієнтацію головних осей.

У роботі [22] зауважено, що при автономному зондуванні невідомих орбітальних цілей питання одночасного отримання положення, орієнтації та 3D-структури цілей при обертальному русі без будь-якої попередньої інформації залишається відкритим. У статті розглядається проблема візуальної локалізації та 3D-реконструкції за умови, що встановлена на космічному апараті монокулярна камера є єдиним доступним датчиком. У статті [23] представлено архітектуру відносної навігації на основі приладу лідар, розроблену для роботи з некооперованими та невідомими цілями. Вона містить два послідовні функціональні блоки. Перший спрямований на реконструкцію геометричної моделі цілі шляхом рекурсивної реєстрації послідовних хмар точок. Отримана реконструйована модель потім використовується в другому блоці, який реалізує алгоритми реєстрації на основі моделі для точної оцінки просторового положення цілі.

В результаті аналізу робіт, присвячених етапу інкапсуляції, можна зробити такі висновки. Підхід, що спирається на закони поведінки природних систем за рахунок введення потенційних полів тяжіння та відштовхування тощо є цілком прийнятним, як такий, що забезпечує рівномірне розподілення агентів на безпечній відстані від об’єкта, та сприяє вирішенню визначення параметрів руху та характеристик об’єкта. Дослідження з оцінки параметрів руху, інерційних параметрів та визначення геометрії поверхні об’єкта спрямовані на удосконалення існуючих та розробку нових методів. Є тенденція до використання переваг ройових технологій визначення названих параметрів.

Етап 2: захоплення об’єкта агентами з метою подальшого керування рухом, тобто механічний контакт агентів з об’єктом, їх кріплення на поверхні об’єкта. Задачі етапу:

– вибір ділянок поверхні об’єкта для кріплення агентів (точок кріплення);

– вибір стратегії поведінки агентів для механічного контакту з об’єктом;

– механічний контакт агентів з об’єктом.

Як зазначено в [10], існуючі підходи до багатоагентних операцій орбітального сервісу об’єктів зосереджувалися переважно на завданнях інспекції до захоплення або маніпуляцій після захоплення, що залишило помітну прогалину в методологіях колективного захоплення цілей із використанням декількох космічних апаратів. Згідно з запропонованою в [10] методологією фаза інкапсуляції закладає основу для фази захоплення, полегшуючи оцінку кінематичних параметрів, визначення центра маси цілі, реконструкцію її форми, а також ідентифікацію та характеристику точок контакту або кріплення. На фазі захоплення агентам призначаються конкретні точки контакту для переслідування (зближення), після чого розпочинається операція захоплення. Кожен агент самостійно визначає доступні точки захоплення та бере участь в алгоритмі їх розподілу на основі аукціону, щоб колективно розподілити оптимальні позиції захоплення між агентами. Одне з поведінкових правил – вирівнювання орієнтації – забезпечує спрямованість кожного агента на спостережувані особливості поверхні. Для забезпечення координації між агентами реалізовано протокол лінійного консенсусу [24], що дозволяє рою узгодити час проведення маневру захоплення.

Згідно з [24], проблема реконфігурації рою складається з двох частин: розподілу (assignment) та формування траєкторії. Проблема розподілу полягає в пошуку оптимального відображення набору агентів набору цілей або завдань,

щоб мінімізувати загальну вартість виконання завдання. У [24] вирішено задачу розподілу (assignment) агентів і цілей за допомогою запропонованого алгоритму розподіленого аукціону розподілу (VSDAA – a variable-swarm distributed auction assignment) та задачу оптимізації траєкторії агентів за допомогою послідовного опуклого програмування (SCP-sequential convex programming). Одним з важливих аспектів алгоритму розподілу є його універсальність для адаптації до інформації, зокрема щодо уникнення зіткнень та щодо відключених мереж зв'язку. В роботі наведено також характеристику існуючих алгоритмів знаходження оптимального розподілу.

Питання кріплення агентів на поверхні цілі. Дослідження з використання ройової технології для керування відносним рухом об'єктів орбітального сервісу, як правило, спираються на припущенні, що кріплення агентів на поверхні об'єкта виконується за допомогою пристроїв з геконоподібними присосками. У роботі [25] підкреслено, що подібний підхід є найпоширенішим серед потенційних роботизованих рішень проблеми захоплення супутників. Ще в роботі [26] було досліджено проблему автономного захоплення та стабілізації об'єктів, що здійснюють неконтрольоване обертання («перекидання») в умовах мікрогравітації, за допомогою роботизованих захоплювачів, оснащених сухими адгезивами, натхненними структурою лап гекона. Об'єкти, які мають значні відносні лінійні та кутові швидкості, є серйозним викликом для традиційного захоплення маніпуляторами за конструктивні елементи (поручні, стикувальні вузли, пази тощо). Авторами було продемонстровано переваги так званого «поверхневого захоплення», яке дозволяє значно розширити діапазон точок контакту на корпусі цільового об'єкта, перетворюючи будь-яку гладку поверхню на придатне місце для кріплення агентів. Отримані результати дослідження дозволяють оптимізувати планування траєкторій для майбутніх автономних вільнолітаючих (free-flyer) роботів під час виконання операцій з видалення космічного сміття та орбітального обслуговування.

Дослідження, яке описане в [27], також присвячене проєктуванню та моделюванню захватів, що активуються зсувом (shear-activated grippers). Традиційне захоплення великих предметів зазвичай покладається на тертя, що активується нормальним зусиллям (стисканням), проте це може пошкодити об'єкти. Запропоноване рішення базується на використанні мікроструктурованого матеріалу, натхненного лапами гекона, адгезія якого вмикається при прикладанні зсувного навантаження (shear-activated grippers). Розглянуто типи захоплювачів, в тому числі для криволінійних об'єктів. Було показано, що використання адгезії, керованої зсувом, дозволяє спростити систему керування процесом захоплення. Хоча це дослідження не присвячене питанням використання захоплювачів в умовах мікрогравітації, воно може бути корисним з точки зору моделювання механіки зсувного напруження адгезивної плівки та процесу захоплення.

Призначений для застосування в умовах мікрогравітації роботизований пристрій для захоплення об'єктів детально описаний в роботі [28], де, зокрема, наведено дані про допустимі в залежності від їх напрямку силові впливи, що не руйнують механічний зв'язок між пристроєм та об'єктом.

Для маніпулювання об'єктами в просторі бажано передавати сили та моменти в будь-якому напрямку. Цій вимозі відповідає представлена в [28] інтегрована система для захоплення великих плоских та вигнутих об'єктів за допомогою комбінації клеїв та елементів розподілу навантаження, датчиків,

виконавчих механізмів та нелінійного сумісного зап’ястя. Інтегрований захватний блок поєднує плоскі та вигнуті захватні елементи в розподіленому масиві. Запропоновані моделі прогнозованої здатності до застосування сили та моментів під час маніпуляцій підтверджено випробуваннями в лабораторії та на вільноплаваючих платформах NASA, а також демонстраціями на борту параболічних польотів у невагомості та на Міжнародній космічній станції (МКС). Продемонстровано, що інтегрований захоплювач та його підсистеми можуть масштабувати використання геконоподібного клею на площу понад 100 см² та для маніпулювання об'єктами масою до 370 кг в умовах мікрогравіації. Позначено виклики щодо удосконалення інтегрованого захоплювача. Зокрема зазначено, що межа адгезії змінюється залежно від напрямку навантаження та стану поверхні. Результати випробувань 2021 року геконоподібного пристрою при захоплені вільно літаючого робота Astrobee, що працює всередині МКС, а також результати наземних випробувань пристрою представлено у роботі [29].

Аналізу динаміки контакту та захоплення механізмом захвату на основі сухого зчеплення присвячена робота [30], де розроблено комплексну модель «КА+грипер+об’єкт» динаміки захоплення об'єктів у космічному просторі за допомогою механізмів, що функціонують на принципах сухої адгезії. Зазначено, що поведінка біоінспірованих адгезивних матеріалів під час зіткнень досі залишається недостатньо вивченою, що ускладнює точне визначення контактних сил під час зіткнень. Як наслідок, перевірка здійсненності та вдосконалення стратегій захоплення на основі адгезії має ґрунтуватися на дорогих і трудомістких фізичних експериментах. У [30] на основі механічних характеристик в’язкопружних матеріалів розроблено модель динамічної поведінки адгезивних матеріалів під дією змінних у часі навантажень. Створено модель динаміки зіткнення-адсорбції, яка враховує оцінку динамічної сили адгезії. Запропонований підхід створює не тільки основу для моделювання та аналізу динаміки систем, а й сприяє проєктуванню та оптимізації механізмів амортизації зіткнень.

У результаті аналізу робіт, присвячених етапу захоплення, можна зробити висновок, що стратегія поведінки рою на цьому етапі виглядає менш дослідженою, ніж на етапі інкапсуляції. Вважаємо, що підхід на основі поведінки природних систем має бути доповнений іншими підходами, які б забезпечували оптимальні за критерієм енергозбереження траєкторії агентів. Наприклад, підходом, що спирається на принципи рухомого (почергового) керування [31], коли у фіксований момент часу керуючий сигнал подається не більше, ніж на один виконавчий орган багатовимірної системи, перемикаючись між ними за певним критерієм (у нашому випадку – подається команда на контакт з ціллю лише одному з агентів).

Питання побудови алгоритму вибору точок кріплення потребує подальших досліджень. Очевидно алгоритм має бути пов’язаним зі способом кріплення агентів на поверхні об’єкта. З іншого боку геометрія розташування агентів на об’єкті має задовольняти умовам ефективного керування рухом об’єкта.

Етапи 3 і 4. Ідентифікація інерційних параметрів та керування відносним рухом об’єкта. Ці етапи об’єднані тут з причини того, що увага дослідників сконцентрована на інтегрованому вирішенні задач цих етапів. Як було зазначено вище, на етапі інкапсуляції пропонується вирішити задачу попередньої оцінки інерційних параметрів об’єкта за даними дистанційних

споспостережень за його рухом. Така оцінка дозволяє спостерігати тензор інерції з точністю до масштабного коефіцієнта.

Для повної оцінки тензора інерції та маси необхідно здійснювати певне силове збудження об'єкта. З іншого боку, приєднання (кріплення) агентів до об'єкта змінює його інерційні характеристики, точніше кажучи, для ефективного керування рухом об'єкта необхідно враховувати інерційні параметри системи об'єкт+агент (агенти). У статі [32] представлено метод розрахунку оптимального збудження, де розглядається задача оцінки інерційних параметрів космічного апарата, оснащеного маховиками. Цей метод може бути використаний стосовно до системи об'єкт+агенти, якщо останні оснащені маховиками.

Проблема визначення невідомих параметрів системи об'єкт+наносупутники та керування її рухом розглянуто у роботі [33]. Ключова новизна роботи полягає в розробці інтегрованого методу ідентифікації та керування, завдяки якому матрицю інерції системи можна оновлювати в реальному часі під час керування орієнтацією. Для підвищення точності оцінки матриці інерції автори ставили за мету створити модифіковане рівняння ідентифікації шляхом фільтрації тих точок вибірки спостережень, які призводять до погано обумовлених обчислень. На основі оціненої в реальному часі матриці інерції розроблено контролер керування орієнтацією. Розроблено схему оптимального розподілу керуючих моментів між окремими наносупутниками з урахуванням обмежень на насичення їхніх приводів за допомогою квадратичного програмування.

У роботі [34], де наведено короткий огляд робіт, присвячених керуванню орієнтацією цільового космічного апарата з невідомими параметрами інерції, досліджується перехоплення керуванням орієнтацією об'єкта з використанням кількох обслуговуючих космічних апаратів. Запропоновано новий ітераційний алгоритм ідентифікації параметрів інерції. Зміна параметрів інерції, спричинена приєднанням кожного обслуговуючого космічного апарата (агента), є перешкодою для стабільного та високоточного керування орієнтацією цілі. На відміну від традиційного методу найменших квадратів, запропонований ітераційний алгоритм використовує лише один набір даних для кожного кроку оновлення та включає ваговий коефіцієнт для поступового послаблення впливу застарілих даних. Це дозволяє миттєво реагувати на стрибкоподібні зміни параметрів системи та усуває проблему «погано обумовлених» обчислень. Завдяки швидкому та точному визначенню параметрів інерції, розроблено контролер орієнтації та метод оптимального розподілу керуючого моменту з метою мінімального споживання енергії. У роботі наведено також короткий огляд робіт, присвячених керуванню орієнтацією цільового космічного апарата з невідомими параметрами інерції.

Отже, увага дослідників сконцентрована на інтегрованому вирішенні задач ідентифікації інерційних параметрів та керування відносним рухом об'єкта та спрямована на оптимальний, енергозберігаючий розподіл керуючих впливів з боку агентів.

Висновки. На основі аналізу публікацій, присвячених проблемі застосування ройових технологій для керування відносним рухом об'єктів, що обслуговуються на орбіті, визначено рівень вирішення задач керування рухом об'єктів на кожному етапі вирішення проблеми: інкапсуляція, захоплення, визначення інерційних параметрів та керування відносним рухом:

– на етапі інкапсуляції підхід, що спирається на закони поведінки природних систем за рахунок введення потенційних полів тяжіння та відштовхування, є цілком прийнятним, як такий що забезпечує рівномірне розподілення агентів на безпечній відстані від об’єкта, та сприяє вирішенню визначення параметрів руху об’єкта;

– стратегія поведінки рою на етапі захоплення виглядає найменш дослідженою. Підхід, що спирається на закони поведінки природних систем на цьому етапі не є цілком прийнятним, як складний у реалізації та такий, що не забезпечує мінімізацію витрат енергоресурсів. На нашу думку, підхід має бути доповнений підходом, що спирається на принципи рухомого керування, як такого, що може забезпечити почергове кріплення агентів до найближчої, у певний підходящий час, точки кріплення. Питання побудови алгоритму вибору точок кріплення потребує подальших досліджень. Очевидно алгоритм має бути пов’язаним зі способом кріплення агентів на поверхні об’єкта. Наприклад, кріплення за допомогою геконоподібних пристроїв потребує вибору гладких ділянок на поверхні об’єкта та має враховувати залежність від їх напрямку допустимих силових впливів, що не руйнують механічний зв’язок між пристроєм та об’єктом. З іншого боку геометрія розташування агентів на об’єкті має задовольняти умовам ефективного керування рухом об’єкта на наступних етапах виконання завдання керування відносним рухом об’єктів орбітального сервісу;

– інтегрований підхід до ідентифікації інерційних параметрів та керування відносним рухом об’єкта є цілком прийнятним, як такий, що забезпечує ефективне керування, в тому числі, при зміні інерційних параметрів системи.

1. *Asri E. G., Zhu Z. H.* An introductory review of swarm technology for spacecraft on-orbit servicing. International Journal of Mechanical System Dynamics. 2024. Vol. 4. P. 3–21. https://doi.org/10.1002/msd2.12098
2. *Chang H., Huang P., Lu Z., Meng Z., Liu Z., Zhang Y.* Cellular Space Robot and Its Interactive Model Identification for Spacecraft Takeover Control. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (Daejeon, Korea, 2016). 2016. P. 3069–3074. https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759475
3. *Chang H., Huang P., Lu Z., Meng Z., Liu Z., Zhang Y.* Inertia parameters identification for cellular space robot through interaction. Aerospace Science and Technology. 2017. Vol. 71. P. 464–474. https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.09.044
4. *Головко М. Г., Безуглый В. А., Бондаренко С. Г., Рубаха Ю. А., Покровский Р. О.* Технические аспекты борьбы с космическим мусором. Екологія та ноосферологія. 2012. Т. 23, № 1–2. С. 110–120.
5. *Фоков А. А., Савчук А. П.* Алгоритмы функционирования автономной системы замедления вращательного движения некооперированного объекта орбитального сервиса. Технічна механіка. 2019. № 4. С. 44–58. https://doi.org/10.15407/itm2019.04.044
6. *Фоков О. А.* Метод визначення зміни просторового положення об'єкта орбітального сервісу з невідомою формою. Технічна механіка. 2024. № 3. С. 35–48. https://doi.org/10.15407/itm2024.03.035
7. *Huang H., Yang L., Zhu Y., Zhang Y.* Collective trajectory planning for satellite swarm using inter-satellite electromagnetic force. Acta Astronautica. 2014. Vol. 104, № 1. P. 220–230. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.07.032
8. *Scharf D. P., Hadaegh F. Y., Ploen S. R.* A survey of spacecraft formation flying guidance and control (part II): control. Proceedings of the American Control Conference. 2004. Vol. 4. P. 2976–2985. DOI: 10.23919/ACC.2004.1384365.
9. *Suzuki M., Uchiyama K., Bennet D. J., McInnes C. R.* Three-Dimensional Formation Flying Using Bifurcating Potential Fields. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (Chicago, Illinois, 10–13 August 2009). AIAA 2009-5884. https://doi.org/10.2514/6.2009-5884
10. *Asri E. G., Zhu Z. H.* Bioinspired consensus-based spacecraft swarm control for autonomous capture of uncooperative targets. Acta Astronautica. 2025. Vol. 234. P. 419–428. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.05.009
11. *Sabatini M., Palmerini G. B.* Collective control of spacecraft swarms for space exploration. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2009. Vol. 105. P. 229–244. https://doi.org/10.1007/s10569-009-9183-8
12. *Zhang Z., Zhu Z. H., Zhang D.* Behavior-Inspired Event-Triggered Control of Spacecraft Swarms for Autonomous Capture of Uncooperative Targets. Engineering. 2026. 30 p. https://doi.org/10.1016/j.eng.2026.04.014
13. *Sabatini M.* Autonomous Control of Satellite Swarms Using Minimal Vision-Based Behavioral Control. Aerospace. 2026. Vol. 13, № 3. 26 p. https://doi.org/10.3390/aerospace13030207

14. *D'Amico S.* Autonomous Formation Flying in Low Earth Orbit : Ph.D. Thesis / Technical University of Delft. Delft, The Netherlands, March 2010.
URL: https://www.researchgate.net/publication/224993195_Autonomous_Formation_Flying_in_Low_Earth_Orbit (дата звернення 12.08.2026).
15. *An M., Wang Z., Zhang Y.* Self-organizing control strategy for asteroid intelligent detection swarm based on attraction and repulsion. Acta Astronautica. 2017. Vol. 130. P. 84–96. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.10.038
16. *Савчук А. П., Фоков А. А.* Определение параметров некооперированных объектов в задачах орбитального сервиса. Технічна механіка. 2018. № 4. С. 30–45. https://doi.org/10.15407/itm2018.04.030
17. *Lichter M. D., Dubowsky S.* Estimation of state, shape, and inertial parameters of space objects from sequences of range images. Proc. SPIE 5267, Intelligent Robots and Computer Vision XXI: Algorithms, Techniques, and Active Vision (30 Sept 2003). 2003. Vol. 5267. P. 194–205. https://doi.org/10.1117/12.514813
18. *Tweddle B. E., Saenz-Otero A., Leonard J. J., Miller D. W.* Factor graph modeling of rigid-body dynamics for localization, mapping, and parameter estimation of a spinning object in space. Journal of Field Robotics. 2015. Vol. 32, № 6. P. 897–933. https://doi.org/10.1002/rob.21548
19. *Setterfield T. P., Miller D. W., Saenz-Otero A., Frazzoli E., Leonard J. J.* Inertial Properties Estimation of a Passive On-Orbit Object Using Polhode Analysis. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2018. Vol. 41, № 10. P. 2214–2231. https://doi.org/10.2514/1.G003394
20. *Matsuka K., Santamaria-Navarro A., Capuano V., Harvard A., Rahmani A., Chung S.-J.* Collaborative Pose Estimation of an Unknown Target Using Multiple Spacecraft. IEEE Aerospace Conference (Big Sky, MT, USA, 2021). 2021. P. 1–11. URL: https://doi.org/10.1109/AERO50100.2021.9438352
21. *Meng Q., Han D., Wang Z.* A model-free method for attitude estimation and inertial parameter identification of a noncooperative target. Advances in Space Research. 2023. Vol. 71, Issue 3. P. 1735–1751. https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.09.029
22. *An Q., Yuan Y., Liu H., Yue X.* Space-based visual localization and 3D reconstruction of unknown orbital target with observability analyses on a ROS/Gazebo-based framework. Chinese Journal of Aeronautics. 2026. Article 104202. https://doi.org/10.1016/j.cja.2026.104202
23. *Nocerino A., Fasano G., Grassi M., Opromolla R.* LIDAR-Based Relative Navigation and 3D Target Reconstruction for Close Proximity Operations with Unknown Target. AIAA SCITECH 2026 Forum (8 Jan 2026). 2026. https://doi.org/10.2514/6.2026-2260
24. *Morgan D., Subramanian G. P., Chung S.-J., Hadaegh F. Y.* Swarm assignment and trajectory optimization using variable-swarm, distributed auction assignment and sequential convex programming. The International Journal of Robotics Research. 2016. Vol. 35, Issue 10. P. 1261–1285. https://doi.org/10.1177/0278364916632065
25. *Spenko M.* Making contact: a review of robotic attachment mechanisms for extraterrestrial applications. Advanced Intelligent Systems. 2023. Vol. 5, № 3. 11 p. https://doi.org/10.1002/aisy.202100063
26. *Estrada M. A., Hockman B., Bylard A., Hawkes E. W., Cutkosky M. R., Pavone M.* Free-Flyer Acquisition of Spinning Objects with Gecko-Inspired Adhesives. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (Stockholm, Sweden, May 16-21, 2016). 2016. P. 4907–4913. https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487696
27. *Hawkes E. W., Jiang H., Christensen D. L., Han A. K., Cutkosky M. R.* Grasping Without Squeezing: Design and Modeling of Shear-Activated Grippers. IEEE Transactions on Robotics. 2018. Vol. 34, № 2. P. 303–316. https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2776312
28. *Jiang H., Hawkes E. W., Fuller C., Estrada M. A., Suresh S. A., Abcouwer N., Han A. K., Wang S., Ploch C. J., Parness A., Cutkosky M. R.* A robotic device using gecko-inspired adhesives can grasp and manipulate large objects in microgravity. Science Robotics. 2017. Vol. 2, № 7. 11 p. https://doi.org/10.1126/scirobotics.aan4545
29. *Chen T. G., Cauligi A., Suresh S. A., Pavone M., Cutkosky M.* Testing Gecko-Inspired Adhesives With Astrobee Aboard the International Space Station: Readying the Technology for Space. IEEE Robotics & Automation Magazine. 2022. Vol. 29, № 3. P. 24–33. https://doi.org/ 10.1109/MRA.2022.3175597
30. *Zhu M., Zhang Y., Chen X.* Contact and Capture Dynamics Analysis of a Biomimetic Dry Adhesion-Based Grasping Mechanism. Journal of Physics: Conference Series. 2025. Vol. 3109. 21 p. https://doi.org/10.1088/1742-6596/3109/1/012061
31. *Алпатов А. П.* Подвижное управление механическими системами. Київ: Наукова думка, 1998. 245 с.
32. *Zhai K., Wang T., Meng D.* Optimal excitation design for identifying inertia parameters of spacecraft. Acta Astronautica. 2017. Vol. 140. P. 370–379. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.08.002
33. *Han N., Luo J., Ma W., Yuan J.* Integrated identification and control for nanosatellites reclaiming failed satellite. Acta Astronautica. 2018. Vol. 146. P. 387–398. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.03.006
34. *Fan S., Xing F., Liu X., Chen X., You Z.* Quick-response attitude takeover control using multiple servicing spacecraft based on inertia properties identification. Advances in Space Research. 2022. Vol. 70, № 7. P. 1890–1916. https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.06.049

Стаття надійшла до редакції 01.09.2026;
прийнято до друку після рецензування 21.09.2026;
дата публікації 28.09.2026