

УДК 621.313

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.13>

ДРОН ДЛЯ ЗБОРУ СМІТТЯ НА ВОДОЙМАХ: ПРОЄКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

Поліщук М.М., Ролік О.І.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ

borchiv@ukr.net, arolick@gmail.com

Однією із сучасних проблем у сфері екології є створення екологічно чистого обладнання для збору сміття на різноманітних водоймах. Сучасні транспортні засоби у вигляді надводного плаваючого обладнання, такого як судна, катери, моторні човни тощо, не відповідають вимогам екологічної чистоти в наслідок притаманних їм викидів продуктів згорання палива для їх двигунів. В той же час все ширше застосування для моніторингу водойм набувають безпілотні літальні апарати у вигляді мультикоптерів чи квадрокоптерів, також відомих під загальною назвою дронів, що є альтернативою використанню традиційних плаваючих засобів. У статті запропонована принципово нова конструкція технологічного оснащення дрону, який має спеціальне призначення, а саме для збору сміття на різних водоймах (річках, озерах, ставках). Конструктивні відмінності нового дрону складають інженерний аспект вирішення означеної проблеми і надають можливість збору сміття переважно у важкодоступних місцях водойм, наприклад таких, як ділянки, що заросли очеретом, осокою, чагарниками водяного горіха й подібною водною рослинністю. Науковий аспект вирішення даної проблеми складає вперше запропонований структурно-параметричний синтез виконавчих органів дрону для збору сміття та їм подібних пристроїв. Головною мотивацією проведених досліджень є створення екологічно чистого встаткування у вигляді безпілотного літального апарату, який призначений для збору сміття на різноманітних водоймах і особливо в їх важкодоступних місцях. Надані результати досліджень можуть бути застосовані для виконання великомасштабних програм екологічного захисту водних ресурсів, бо сприяють вказаним програмам у частці підвищення ефективності, безпечності і економічної доцільності. *Ключові слова:* платформи безпілотників, квадрокоптер, пристрої для збору сміття, моніторинг водойм.

Drone for garbage collection at water reservoirs: design and modeling. Polishchuk M., Rolik O.

One of the modern problems in the field of ecology is the creation of environmentally friendly equipment for collecting garbage on various reservoirs. Modern vehicles in the form of surface floating equipment, such as ships, boats, motor boats, etc., do not meet the requirements of environmental cleanliness as a result of their inherent emissions of fuel combustion products for their engines. At the same time, unmanned aerial vehicles in the form of multicopters or quadcopters, also known as drones, are increasingly being used for monitoring water bodies, which are an alternative to the use of traditional floating vehicles. The article proposes a fundamentally new design of the technological equipment of a drone, which has a special purpose, namely for the collection of garbage on various bodies of water (rivers, lakes, ponds). The structural differences of the new drone make up the engineering aspect of solving this problem and provide the opportunity to collect garbage mainly in hard-to-reach places of water bodies, for example, such as areas overgrown with reeds, sedges, water walnut bushes and similar aquatic vegetation. The scientific aspect of solving this problem is the first proposed structural-parametric synthesis of the executive bodies of the garbage collection drone and similar devices. The main motivation of the conducted research is the creation of environmentally friendly equipment in the form of an unmanned aerial vehicle, which is designed to collect garbage on various reservoirs and especially in their hard-to-reach places. The provided research results can be applied to the implementation of large-scale programs of ecological protection of water resources, because they contribute to the specified programs in terms of increasing efficiency, safety and economic feasibility. *Key words:* drone platforms, quadcopter, garbage collection devices, water body monitoring.

Постановка проблеми. В нинішній час використання дронів для технічного обслуговування водойм стримується рядом важливих обмежень, насамперед відсутністю відповідного технологічного оснащення. Існуючі зразки дронів для моніторингу водойм та збору сміття, аналіз конструкцій яких надано нижче, позбавлені можливості виконання вказаних операцій у важкодоступних місцях водойм, що поросли різноманітною водною рослинністю. Крім того, вкрай бажано створити безпілотний літальний апарат, котрий був би спроможний не тільки до збору сміття, а ще й здійснював попереднє його сортування, що додатково буде сприяти відповідності екологічним вимогам до подібного облад-

нання. Також відсутність будь яких методик параметричного синтезу дронів стримує їх розвиток.

Актуальність дослідження. Використання традиційних плаваючих надводних засобів для технічного обслуговування водойм завдає негативного впливу навколишньому середовищу, оскільки таким засобам як судна, катери та моторні човни притаманний викид в атмосферу забруднювальних речовин в наслідок використання приводів із двигунами внутрішнього згорання.

Альтернативою використанню вказаних засобів із зазначеною метою є створення й експлуатація безпілотних літальних апаратів з електричним приводом пропелерів та дистанційним їх керуванням. Беручи

до уваги, що даний вид техніки повною мірою задовольняє вимогам екологічної чистоти, а його створення перебуває на початковій стадії й тільки у вигляді дослідних зразків, слід вважати викладені нижче дослідження актуальними.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана відповідно до науково-технічної теми ФІОТ-ІТК/2023 «Синтез технологічних роботів довільної орієнтації» за Державним номером реєстрації № 01117U004912, що реалізується в межах досліджень в галузі робототехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», зокрема на базі лабораторії робототехніки кафедри інформаційних систем та технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні й експериментальні дослідження зі створення безпілотних літальних апаратів як різновиду дронів почалися відносно недавно – в останні два десятиліття. В дослідженнях [1, 2] розглянуто поняття дрону, його конструктивну будову, способи та організацію руху у просторі. Значний інтерес викликає використання дронів у сільському господарстві [3]. В цій роботі надана економіко-математична модель дрону та дедуктивний метод для формування висновків функціонування. Однак у вказаних роботах не надані конструктивні ознаки технологічного оснащення для виконання виробничих операцій. Конструкція та польотні характеристики систем на базі безпілотних літальних апаратів достатньо ретельно розглянуті в роботі [4], але без прив'язки до конкретних технологічних операцій. В роботі [5] запропоновано метод ідентифікації плаваючого в морі сміття на базі безпілотного літального апарату, що включає наступні етапи: зйомку та імпорт зображення, а також його фільтрацію. Таким чином визначення розмірів сміття дозволяє здійснити його ідентифікацію, але відсутність будь яких пристроїв для безпосереднього збору сміття обмежує технологічні можливості даного способу. На відміну від попереднього технічного розв'язку в системі збору речовин за допомогою дронів безпілотний літальний апарат [6] містить в собі контейнер, який дозволяє речовинам попадати в ємність для сміття та запобігає виходу речовин з неї. Такий пасивний збір сміття не гарантує надійність захвату різноманітного сміття.

До безпілотних дронів належать не тільки літальні апарати, а також і надводні машини для збору та очищення сміття з каналів і річок. Так, наприклад, машина, що отримала назву Trash Recovery Vehicle [7], складається з двох понтонних конструкцій, які допомагають направляти плаваючі водорості та сміття у визначене місце, де їх збирає рухома платформа та скидає в зону зберігання на борту. Інший надводний дрон відомий під назвою Artemis [8] призначений для збору сміття на великих площах водойм морів і океанів. Однак завдання використання даних

машин в заростях очерету чи осоки, тобто у важкодоступних місцях водойм, є дискусійним в сенсі збереження флори та фауни водойм.

Не зважаючи на те, що літальні безпілотні апарати значно поступаються надводним засобам вантажопідйомністю, наукова та інженерна спільнота віддають їм перевагу в наслідок їх мобільності. Наприклад, безпілотний літальний апарат для прибирання сміття [9] містить механічну руку із електромеханічним захватом, ємність у вигляді мішка для збору сміття, що покращує технологічні можливості цього апарату, але водночас не дозволяє здійснювати попереднє сортування сміття. Так званий, реконфігураційний (в сенсі здатності змінювати свою структуру) безпілотний літальний апарат [10] для очищення русла ріки від сміття містить гексагональні кільця для захисту пропелерів від зіткнення з зовнішніми перешкодами, що покращує його можливості для збору сміття у важкодоступних місцях водойм, але наявність тільки одного типу захватного пристрою при різноманітті сміття у водоймах, позбавляє вказаний літальний апарат можливості здійснення попереднього сортування сміття. Не аби який інтерес викликає інтелектуальна система моніторингу сміття на базі безпілотника [11] з використанням комп'ютерного зору, що дозволяє здійснювати ідентифікацію різновидів сміття. Таким чином, аналіз наведених технічних рішень вказує на необхідність створення дрону для збору сміття у важкодоступних місцях водойм з одночасною можливістю попереднього сортування різновидів сміття.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Не дивлячись на різноманіття технічних рішень дронів для збирання сміття, досі відсутній дрон, котрий був би здатний здійснювати виконання означеної операції у важкодоступних місцях водойм з одночасним сортуванням сміття під час його збору. Крім того, дотепер відсутня методика параметричного синтезу подібних дронів, яка б дозволила здійснювати їхнє проектування та моделювання.

Новизна. Інженерна новизна конструктивних рішень дрону для збору та сортування сміття на водоймах полягає в наявності роторного накопичувача з кількома ємностями для різного сміття та виконання захватних органів дрону у вигляді револьверної головки з різними захватами. Наукову новизну складає вперше запропонована методика структурно-параметричного синтезу подібних дронів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонована модифікована методика структурно-параметричного синтезу дронів для збору та сортування сміття. Пропонована модифікація полягає в відображенні не тільки наявності зв'язку критеріїв оптимізації з незалежними змінними в межах цільових функцій, але ще й зв'язок самих цільових функцій на різних рівнях такої ієрархічної технічної системи як дрон для збору сміття на водоймах.

Викладення основного матеріалу. Для полегшення розуміння нижче наданої методики структурно-параметричного синтезу дрону, спочатку розглянемо принципово нову конструкцію [12] та алгоритм функціонування дрону.

Конструкція дрону. На рис. 1 надано загальний вигляд безпілотного літального апарату, який містить квадрокоптер з чотирма пропелерами із приводом від електричних двигунів, опори для базування, відеокамеру для розпізнавання об'єктів сміття, захватні пристрої та роторний накопичувач для попереднього сортування сміття. На нижній частині корпусу дрону на консолях (рис. 2) встановлено, що найменше, три ємності для сортування сміття, постачених приводом періодичного обертання від електродвигуна через зубчасту передачу.



Рис. 1. Дрон для збору сміття на водоймах

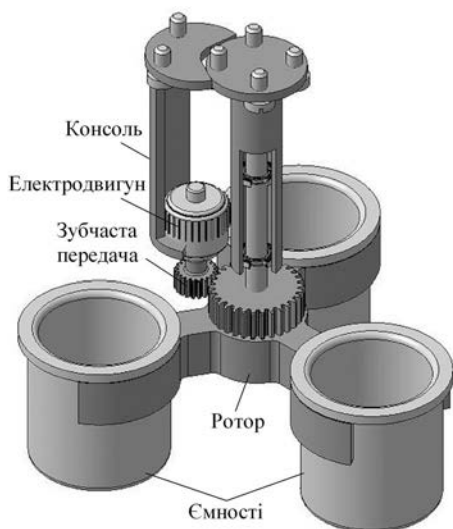


Рис. 2. Роторний накопичувач сміття (див. фрагмент «А» на рис. 1)

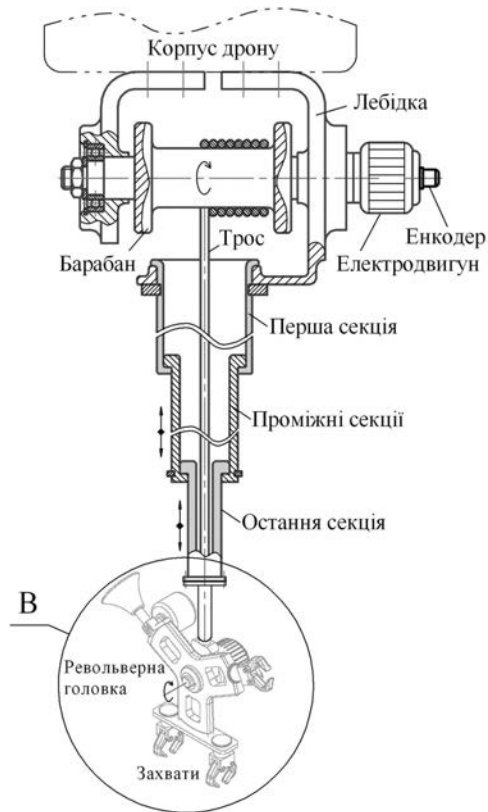


Рис. 3. Тросова лебідка дрону з телескопічною штангою (див. фрагмент «Б» на рис. 1)



Рис. 4. Револьверна головка із захватами для сміття (див. фрагмент «В» на рис. 3)

Власне ротор, що несе ємності, розміщено на опорах кочення, вмонтованих в одну із консолей. Також на нижній частині дрону встановлено лебідку (рис. 3) з приводом від електродвигуна з енкодером для обчислення кількості обертів барабану лебідки. На корпусі лебідки розміщена телескопічна штанга, яка виконана у вигляді коаксіальних трубчастих секцій, перша з яких нерухомо закріплена на корпусі лебідки, а остання з'єднана з револьверною головою

захватів для сміття та з тросом лебідки, який розміщений в середині секцій. Вказана револьверна головка містить вакуумний захват (рис. 4) для плоских форм сміття, двох пальцевий та чотирьох пальцевий захвати відповідно до співвідношень габаритів сміття, а саме: при $D \gg L$ та при $D \ll L$, де: D – максимальний габарит; L – довжина об'єкту сміття. Вказаний вакуумний захват оснащений балонним стислого повітря з ежектором, електромагнітними клапанами та датчиком вакууму. Таке рішення дозволяє створювати зону вакууму між присосом захвату і плоскою поверхню об'єкту сміття без такого вкрай важкого пристрою як компресор, хоча і потребує періодичної зарядки балону стислим повітрям із заданим тиском.

Дрон працює наступним чином. У початковому стані коаксіальні секції телескопічної штанги знаходяться у згорнутому стані між ємностями роторного накопичувача. По заданим оператором координатам дрон прилітає та точку збору сміття і після ідентифікації об'єкту сміття відеокамерою, за командою або оператора, або згідно програми керування дроном, включається електродвигун барабану лебідки, який розмотує трос і під дією сили ваги револьверної головки коаксіальні секції розсовуються на величину згідно заданої кількості сигналів енкодера електродвигуна лебідки. Далі залежно від результату ідентифікації об'єкту сміття револьверна головка під дією електродвигуна повертає один із захватів для контакту з об'єктом сміття. Якщо форма об'єкту сміття наближена до форми умовного «диску» чи умовного «циліндру» (співвідношення їх габаритів див. вище), то вмикається привод одного із захватів і об'єкт сміття ними захватується. У разі плоскої форми сміття за командою повертається револьверна головка, подаючи вакуумний захват до об'єкту сміття. Для спрацювання вакуумного захвату відкривається електромагнітний клапан і стисле повітря з балону витікає під тиском з ежектора, в результаті чого (згідно відомому ежекційному ефекту) між поверхнею плоского об'єкту сміття і порожниною вакуумного присосу створюється вакуум певної глибини (від 0,2 бар до 0,4 бар), що призводить до захвату сміття. Після чого, за сигналом вакуумного датчика, електромагнітні клапани закриваються. Після забору сміття тим чи іншим захватом вмикається реверс електродвигуна лебідки і на її барабан намотується трос, тим самим, згортаючи телескопічну штангу. Залежно від результату ідентифікації сміття, а точніше залежно від того, яким типом захвату об'єкт був захоплений, поворотом від електродвигуна роторного накопичувача одна з ємностей розташовується під револьверною головкою, тобто під відповідним захватом, яким об'єкт сміття був захоплений. Захват вмикається і сміття попадає у відповідну ємність. Таким чином здійснюється попереднє сортування сміття. Далі цикл повторюється. Запропонований дрон може бути реалізований в умовах промисло-

вого виробництва з використанням стандартного встаткування, сучасних матеріалів і технологій на будь-якому машинобудівному підприємстві.

Параметричний синтез дрону. Згідно класичного тлумачення параметричний синтез – це процес визначення оптимальних або квазіоптимальних параметрів елементів синтезованого об'єкта при задоволенні умовам технічного завдання. При параметричному синтезі структура повинна бути задана. На основі методу морфологічного конструювання попередньо виконано синтез необхідної структури, що виділена на морфологічному графові (рис. 5) стовщеними лініями зі стрілками й позначеннями рівнів структури, що відображають пристрої та відповідні до них цільові функції для оптимізації їх параметрів. Зв'язок цільових функцій на рис. 5 показано штриховими стрілками. Отже, на 1-му рівні параметричного синтезу для даної морфологічної комбінації цільова функція включає фактори, що визначають аеродинамічну підйомну силу F кожного гвинта квадрокоптера, а саме:

$$F = \pi \frac{D^2}{4} V \rho u \Rightarrow \max, \quad (1)$$

при обмеженні: $F \geq K(m_k + m_l + m_r)g$, де: $\pi D^2/4$ – площа поверхні, що відмітається несучим гвинтом; V – швидкість польоту, в м/сек.; ρ – щільність повітря; u – індуктивна швидкість струменя, що йде від гвинта, в м/сек.; K – коефіцієнт запасу; m_k, m_l, m_r – відповідно маса квадрокоптера, лебідки та револьверної головки із захватами; g – прискорення вільного падіння.

На 2-му рівні синтезу для морфологічної комбінації рис. 5 цільову функцію можна записати як функцію крутного моменту M_d двигуна тросової підйомної лебідки:

$$M_d = \frac{N_d}{\omega} i \Rightarrow \min, \quad (2)$$

при обмеженні $M_d \geq Rm, g$, де: N_d, ω – потужність і кутова швидкість двигуна лебідки, відповідно; i – передаточне відношення приводу лебідки; R – радіус барабану лебідки.

Для 3-го рівня синтезу морфологічної комбінації ознак дрону цільову функцію можна представити у вигляді формули сили ваги G револьверної головки із захватами:

$$G = m, g = (m_d + \sum_{k=1}^n m_k)g \Rightarrow \min, \quad k = 1, 2, 3 \dots n \quad (3)$$

де: m_d – маса приводу обертання револьверної головки; n – кількість захватів для сміття.

На 4-му рівні параметричного синтезу цільовими функціями можуть служити формули сил захватів для різного виду сміття. Наприклад, для вакуумного захвату сила P утримання плоского об'єкту сміття складає:

$$P = s_p K_s (p_a K_a - p_s) K \Rightarrow \max; \quad P \geq mg, \quad (4)$$

де s_p – площа, обмежена внутрішнім контуром присоса, м²; $s_p = \pi d^2 / 4$; d – діаметр зони вакуумування;

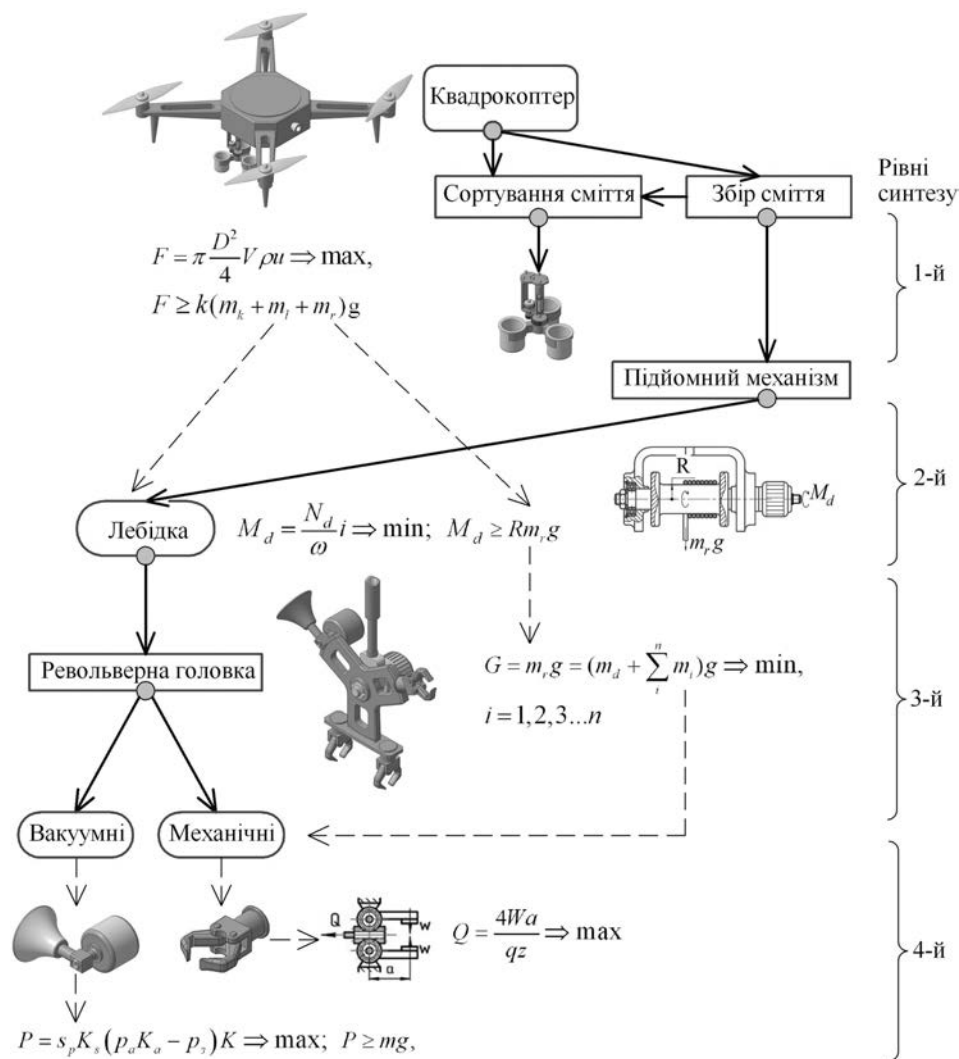


Рис. 5. Структурно-параметрична модель дрону для збору сміття

K_s – коефіцієнт зменшення площі присоса внаслідок деформації ущільнення ($K_s = 0,95 \dots 1$ для ущільнень пористих гум); $p_a = 101 \times 10^3$ (Па) – атмосферний тиск; $p_s = (40 \dots 60) \times 10^3$ (Па) – залишковий тиски всередині камери; K_a – коефіцієнт, яким урахують зміни атмосферного тиску ($K_a = 0,9$); K – коефіцієнт, яким урахують приплив повітря у місці контакту ущільнення камери (присоса) з поверхнею об’єкта ($K = 0,65 \dots 0,85$).

Для механічного захвату, наприклад, із зубчасто-рейковим передавальним механізмом сила Q приводу складає:

$$Q = \frac{4Wa}{qz} \Rightarrow \max, \quad (5)$$

де: W – сила затиску об’єкту сміття; a – виліт (довжина) пальців захвату; q – модуль зубчастої передачі; z – кількість зубів приводної шестерні.

Зазначені цільові функції параметричного синтезу можуть бути доповнені й змінені, тим більше, коли буде поставлено аналогічне завдання оптимізації для інших гілок морфологічного графа. На даному етапі

згідно запропонованій модифікації параметричного синтезу надзвичайно важливий параметричний взаємозв’язок цільових функцій оптимізації компонентів структури, як ієрархічної багаторівневої технічної системи, показаної на прикладі дрону для збору сміття. Створення подібних формалізованих моделей, тобто у взаємозв’язку цільових функцій на різних рівнях ієрархії системи, дозволить максимально підвищити їхню адекватність реальним умовам експлуатації безпілотних літальних апаратів, призначених для виконання інших технологічних операцій.

Головні висновки. Завдяки виконанню ємності для сміття у вигляді роторного накопичувача, який містить, що найменше, три різновиди ємностей, та виконанню захватного пристрою у вигляді револьверної головки, яка містить кілька видів захватів відповідно до різноманітності сміття, дана сукупність конструктивних ознак суттєво розширює технологічні можливості дрону для збору сміття за рахунок здійснення попереднього сортування сміття, що вкрай важливо не тільки для більш раціо-

нального використання ресурсу часу польоту дрона, зокрема, а й для підвищення екологічної чистоти процесу збору сміття, взагалі.

Виконання висувної телескопічної штанги, що з'єднує квадрокоптер із захватами, у вигляді кількох коаксіальних трубчастих секцій і постачання її приводом висування та згортання від лебідки з тросом, що розміщений всередині трубчастих секцій, дозволяє суттєво зменшити вагу телескопічної штанги за рахунок компактності її конструкції.

Модифікація параметричного синтезу, що полягає у взаємозв'язку цільових функцій на різних рівнях синтезу, надає можливість шляхом знаходження квазіоптимальних розв'язків, суттєво підвищити

ефективність проектування дронів для збору сміття на різноманітних водоймах, а отже, і їхньої майбутньої експлуатації.

Перспективи використання результатів дослідження. Оскільки створення безпілотних літальних апаратів для збору сміття знаходиться на початковій стадії, то вкрай важливо використання не тільки принципово нових конструкцій подібних дронів, а й модифікованих методик їх проектування. Такий підхід до синтезу дронів вказаного типу дозволить в кінцевому підсумку створювати нові засоби виробництва, що відповідають вимогам забезпечення екологічної чистоти обладнання для обслуговування різноманітних водойм.

Література

1. Макаров В.С. Новітні технології в комп'ютерно-технічній експертизі: дослідження дронів. URL: International Scientific Journal "Internauka" URL: <http://www.inter-nauka.com/> (дата звернення 10.01.2024 р.)
2. Azhar MA Hannan Bin Azhar, Thomas Edward Allen Barton, Tasmina Islam. Drone Forensic Analysis Using Open Source Tools. Journal of Digital Forensics, Security and Law, Volume 13 (1), pp. 12–17.
3. Пономаренко І.О., Тарасов В.А., Ігнатченко А.С. та інш. Економічна ефективність використання дронів у сільському господарстві. Вісник СумДУ. Серія «Економіка», № 4, 2021, с. 235-240.
4. Чемен С. Ю., Водічев В. А. Конструкція та польотні характеристики систем на базі безпілотних літальних апаратів. ISSN 2221-3805. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2021. № 34 (110), с. 1–9.
5. Li Jun, Xu Man, Zhao Xiangjun, Xu Zhongjian, Zhu Biliang. Patent China CN111079724 Int. Cl. G06K 9/00; B64C 39/02. Unmanned aerial vehicle-based sea floating garbage identification method. Filed: 2020.04.28. Date of Patent: 2020.06.30.
6. Andrew John Fox, Michelle Caruana, Laguna Hills. Patent US 10877477 Int. Cl. B64D 27/24. Drone-enabled substance collection system. Filed: Mar. 14, 2018. Date of Patent: Dec. 29, 2020.
7. Vyom Rajan Singh, Chandan Kumar. Drone to Collect and Clean Debris from Canals and Rivers. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181, Vol. 9 Issue 07, July-2020, pp. 381–390.
8. Andrew C. Josselyn. A Consumer-based Aquatic Trash Collecting Drone: A Engineering Design Case Study (2021). Honors Projects. 117. URL: <https://digitalcommons.spu.edu/honorsprojects/117>
9. Liu Zhiqi, Wang Yuwei, Wang Yuanzhuo, et al. Unmanned aerial vehicle for clearing away garbage. Patent China CN215590999 Int. Cl. B64C 39/02. Filed: 2021.07.30. Date of Patent: 2022.01.21.
10. Gu Ke. Reconfigurable unmanned aerial vehicle applied to river channel garbage cleaning. Patent China CN115180148 Int. Cl. B64C 39/02. Filed: 2022.07.25. Date of Patent: 2022.10.14.
11. Parag Achaliya, Govind Bidgar, Hrutika Bhosale, et al. Drone based smart garbage monitoring system using computer vision. International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT). Volume 8, Issue 4 April 2020, pp. 1066–1071.
12. Ролік О.І., Поліщук М.М. Дрон для збору сміття у важкодоступних місцях водойм. Заявка на видачу патенту на винахід № а202305017, МПК В64С 39/02. «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» (УКРНОІВІ); заявл. 25.10.2023, 11 с.