

**МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РОЄМ БПЛА ПРИ
ОБПРИСКУВАННІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР АГРОХІМІЧНИМИ
ПРЕПАРАТАМИ**

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

Н. А. Пасічник, кандидат сільськогосподарських наук, доцент

О. О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Якушов, аспірант

Т. С. Давиденко, аспірант

М. В. Редько, слухач магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: Ozon.kiev@nubip.edu.ua

Анотація. Робота присвячена дослідженням щодо оптимального управління роєм БПЛА при обприскуванні енергетичних культур отрутохімікатами. Актуальність роботи полягає в тому, що нині під час вирішення завдань хімічного захисту рослин з використанням БПЛА відбувається на основі індивідуального досвіду людини-оператора, яка здійснює управління роєм БПЛА, як правило, не оптимальним шляхом із значними часовими та вартісними витратами.

Метою досліджень є розробка методичних засад оптимального управління роєм БПЛА при обприскуванні енергетичних культур агрохімічними препаратами. Для досягнення поставленої мети вирішенні такі задачі: обґрунтовано постановку задачі оптимізації управління роєм БПЛА з урахуванням обмежень на часові й вартісні витрати на виконання завдань хімічного захисту рослин, розроблено метод оптимального управління роєм БПЛА при обприскуванні енергетичних культур отрутохімікатами та листового підживлення за допомогою якого забезпечується вирішення завдань щодо максимізації кількості обприскуваних рослин на кожній ділянці поля при обмеженнях на часові та вартісні витрати, розроблена структурна схема рішення задачі оптимізації управління роєм БПЛА для якісного відпрацювання завдань хімічного захисту рослин. Наукова новизна роботи полягає у застосуванні методу динамічного програмування при розподілу та управлінні роєм БПЛА на кожній ділянці при обприскуванні енергетичних культур агрохімічними препаратами. Практична значимість роботи полягає у розробці структурної схеми вирішення задачі оптимізації управління роєм БПЛА, за допомогою якої у спеціальному програмному забезпеченні автоматизованого робочого місця оператора розраховується оптимальна кількість БПЛА у визначеній часовій послідовності для якісного відпрацювання завдань хімічного захисту та підживлення рослин.

Ключові слова: *рій БПЛА, оптимальне управління, обприскування рослин, метод динамічного програмування*

Актуальність. Як показано в роботі P. Rochwatka et al (2020) [1], для отримання теплової та електричної енергії за допомогою біогазових заводів все частіше використовуються енергетичні культури (ЕК), які спеціально вирощуються. Особливо енергетичні культури є актуальними в концепції енергетичних громад орієнтованих і на місцеві енергетичні джерела, що за даними S. Szewczuk (2015) [2] є перспективним для країн із помірним та теплим кліматом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За даними фахівців ООН, приріст сільськогосподарської продукції на 70 % може бути досягнутий за рахунок вдосконалення агротехнічних прийомів. У роботі Carolina Boix-Fayos et al (2023) [3] описані основні підходи, а саме: застосування хімічних способів боротьби зі збудниками захворювань рослин, шкідниками, гризунами, а також внесення добрив для підживлення рослин та збагачення мінерального складу ґрунту. Проривні результати можуть бути досягнуто завдяки впровадженню новітнього прийому з використанням рою БПЛА для обробки рослин хімічними препаратами. Перспективними вважаються впровадження біологічних рішень, коли виявивши надмірне джерело розповсюдження шкідників, рой БПЛА збільшує кількість апаратів на цій ділянці M. Tropea and A. Serianni (2023) [4]. Фактично такий підхід можна віднести до прояву концепції інтернету речей, показаної стосовно точного землеробства I. Guven and M. Parlak (2022) [5].

У зв'язку з цим автоматизація управління в галузі виробництва енергетичних сільськогосподарських культур, створення умов для швидкого впровадження сучасних інтенсивних технологій, форм та методів управління виробництвом продукції рослинництва належать до перспективних напрямів інформатизації та автоматизації технологічних процесів.

Завдання хімічного захисту рослин є комплексним завданням, що включає:

- підтримку агрохімічного складу ґрунту на рівні, оптимальному для повноцінного розвитку енергетичних рослин за рахунок збалансованої системи добрив;

- знищення бур'яну та боротьба із засміченістю родючого ґрунту;
- усунення захворювань рослин; знищення джерел хвороб;
- боротьбу із шкідниками рослин.

Вирішення цього комплексного завдання передбачає реалізацію певної послідовності заходів:

- оцінку фактичного агрофону та фітосанітарного стану поля з відносно високою частотою;
- прогнозування стану розвитку рослин та ступеня загрози шкідливих факторів; планування системи заходів для захисту рослин відповідно до факторів загрози – незбалансованості складу ґрунту, засміченості, ступеня розвитку джерел хвороб та шкідників;
- визначення методів та засобів впливу на агрофон та санітарний стан поля; прийняття рішень щодо управління системою позакореневого підживлення та захисту рослин.

Для виконання цих заходів своєчасно та якісно необхідно здійснити збір та обробку інформації про велику кількість факторів, врахувати цю інформацію при прийнятті рішень щодо хімічного захисту рослин. Ці функції мають бути реалізовані за допомогою спеціальної системи керування роєм БПЛА (СКР БПЛА).

Розглянемо основні засади створення СКР БПЛА щодо хімічного захисту рослин (ХЗР). В їх основу мають бути покладені загальні принципи створення автоматизованих систем: системності, розвитку (відкритості), сумісності, стандартизації (уніфікації) та ефективності.

Основними вимогами до СКР БПЛА є:

1. Наявність засобів, що створюють комфортні умови для користувача: видача рекомендацій у наочному вигляді оптимального управління (розподілу) БПЛА між ділянками полями для вирішення задач ХЗР.

2. Можливість обробки даних на основі як класичних методів прийняття оптимальних рішень, так і методів логічного аналізу неформалізованої інформації, закладеного у знаннях та досвіді конкретного експерта.

3. Наявність засобів, які дозволяють використовувати ПЕОМ для виконання рутинних робіт, пов'язаних із традиційною обробкою інформації та контролю процесу вирішення завдань.

Розв'язання задач управління роєм БПЛА при обприскуванні енергетичних культур отрутохімікатами за допомогою СКР є особливо актуальним завданням хімічної захисту рослин.

Мета дослідження – розробка методичних засад оптимального управління роєм БПЛА при обприскуванні енергетичних культур агрохімічними засобами.

Для досягнення поставленої мети виникає необхідність у вирішенні таких задач:

1. Сформулювати постановку задачі оптимізації управління роєм БПЛА з урахуванням обмежень на часові й вартісні витрати на виконання завдань хімічного захисту та підживлення рослин.

2. Розробити метод оптимального управління роєм БПЛА при обприскуванні енергетичних культур агрохімічними препаратами, за допомогою якого забезпечується вирішення завдань щодо максимізації кількості обприскуваних рослин на кожній ділянці поля при обмеженнях на часові та вартісні витрати.

3. Розробити структурну схему рішення задачі оптимізації управління роєм БПЛА для якісного відпрацювання завдань ХЗР.

Матеріали та методи дослідження. Дрони-обприскувачі є доступними за ціною політикою та простими в експлуатації, можуть окупити себе та продемонструвати позитивний ефект за один сезон Jiguang Zhang et al (2023) [6] та Guobin Wang et al (2020) [7]. Вдосконалення існуючих та розробка універсальних літаючих роботів-оприскувачів отрутохімікатами обумовлює підвищення вимог до якості управління роєм БПЛА при часових (вартісних) обмеженнях за допомогою спеціальної СКР.

Роботи в цьому напрямку щодо роботи БПЛА аграрного спрямування для агрохімічного забезпечення проводились. З урахуванням можливих проблем із інфраструктурою щодо точного позиціонування і керування по радіоканалу розроблялись питання щодо спеціальних БПЛА із тривалим терміном польоту

завдяки сонячним гальванічним елементам показаним D. Karabetsky et al (2018) [8] та D. Karabetsky et al (2019) [9]. Оскільки через поля прокладено значну кількість електричних мереж високої напруги стандартна навігація на базі GPS може бути ускладнена і відповідно розроблялись спеціалізовані технології візуальної навігації, які показані в A. Godny et al (2018) [10] та M. G. Lutsky et al (2021) [11]. Щодо дистанційного моніторингу створювали методики оцінки відповідності зйомки щодо коректності оцінки сонячного освітлення, які показані в N. A. Pasichnyk et al (2021) [12], а також визначення стресових ділянок із ідентифікацією причин стресу технологічного характеру D. Komarchuk et al (2020) [13]. Тобто, аналіз літературних джерел свідчить що стосовно агрохімічної обробки посівів є певні напрацювання стосовно одиночних дій БПЛА і відповідно є методичні пробіли в розрізі оптимального управління стосовно саме рою БПЛА.

Як показує практика, управління роєм БПЛА відбувається на основі особистого досвіду оператора за допомогою засобів дистанційного управління. Організаційно покращенню керування може сприяти навчання операторів як показано в Y. A. Gunchenko et al (2016) [14], проте технологія щодо агрохімічного спрямування є відносно новою і досвід для підготовки навчальних програм може виявитись недостатнім. У даному випадку керування групою БПЛА призводить до нераціонального часу їх використання та значних вартісних витрат, що особливо актуально для переважної більшості сучасних БПЛА із акумуляторним електроживленням D. S. Komarchuk et al (2021) [15]. Можливим варіантом рішення є хмарні рішення щодо керування роєм БПЛА, які показані в J.S. Alatas et al (2022) [16], проте з урахуванням наявної мережі комунікацій реалізація такого підходу в Україні ускладнена.

Перспективним напрямком усунення зазначеного недоліку є розробка та використання в математичному забезпеченні СКР методу оптимального управління роєм БПЛА, які показані в A. Wu et al (2023) [17]. Стосовно завдань агрохімічної обробки посівів, якому притаманне різноманітне обладнання (моніторинг, обприскування, ретрансляція сигналів тощо) може використовуватись децентралізоване керування, описане S. Mian et al (2020) [18]. Запропоноване керування вимагає попереднього

моделювання, що при достатній обчислювальній потужності може бути реалізованим.

Результати досліджень та їх обговорення. При розробці методу оптимального управління роєм БПЛА передбачається, що процес ХЗР являє собою керований N -етапний динамічний процес, який на кожному (n -му) етапі характеризується двома видами параметрів: параметрами керування m_n (кількістю спланованих БПЛА на n -ю ділянку енергетичних культур) і параметрами стану $G_n(m_n)$ (кількістю обробленої біомаси отрутохімкатами на n -му етапі). У вигляді обмежень виступає сумарний ресурс часу робіт (T) та витрат (C), що виділяється на ХЗР.

Кінцевою метою оптимального управління (W_N) є максимальна кількість обробленої біомаси отрутохімкатами.

Загалом задача оптимального управління роєм БПЛА різних видів ЕК може бути подана так.

Знайти

$$\max W_N = \sum_{n=1}^N G_n(m_n) \quad (1)$$

при $T_N \leq T; \quad C_N \leq C, \quad (2)$

де T_N – використаний час на протязі N етапів збиральної кампанії; C_N – витрати на протязі N етапів ХЗР.

Таким чином, необхідно знайти таку кількість БПЛА або їх проходжень (m_n) на кожному етапі, щоб максимізувати цільову функцію (1) при таких обмеженнях:

$$\left. \begin{array}{l} a) \quad m_n = 0, 1, 2, \dots, \\ \acute{a}) \quad \sum_{n=1}^N t_n m_n \leq T, \\ \hat{a}) \quad \sum_{n=1}^N c_n m_n \leq C, \end{array} \right\} \quad (3)$$

де t_n – час виконання робіт на n -ій ділянці поля; c_n – вартісні витрати застосування БПЛА при виконанні n -го етапу агрохімічних заходів.

Для знаходження оптимальних значень (m_n) скористаємося методом динамічного програмування Х. Qiu et al (2021) [19].

Оскільки в задачі є два види ресурсів (T та C), необхідно ввести два параметри становищ ξ_T та ξ_C .

Позначимо

$$\max_{m_1, \dots, m_k} \sum_{n=1}^k G_n(m_n)$$

при умові

$$\sum_{n=1}^k t_n m_n \leq \xi_T; \quad \sum_{n=1}^k c_n m_n \leq \xi_C; \quad m_n \geq 0, \quad n = 1, \dots, k.$$

через $A_k(\xi_T; \xi_C)$.

Після нескладних перетворень приходимо до наступного основного рекурентного співвідношення динамічного програмування:

$$A_k(\xi_T, \xi_C) = \max_{0 \leq m_k \leq \delta_k} [G_k(m_k) + A_{k-1}(\xi_T - t_k m_k; \xi_C - c_k m_k)],$$

де

$$\delta_k = \min \left\{ \left\lfloor \frac{\xi_T}{t_k} \right\rfloor; \left\lfloor \frac{\xi_C}{c_k} \right\rfloor \right\}.$$

Одночасно з $A_k(\xi_T; \xi_C)$ знаходимо й оптимальне рішення $m_k^o(\xi_T; \xi_C)$. На N -му етапі визначаємо $A_N(T; C)$ та одночасно – $m_N^o(T; C)$.

Найбільш вагомою перешкодою у вирішенні цієї задачі є велика її розмірність. Тому, з метою зниження розмірності, від задачі (1) перейдемо до задачі з одним обмеженням

$$\max_{\{m_n\}} W_1 = \max_{\{m_n\}} \sum_{n=1}^N G_n(m_n) - \lambda \sum_{n=1}^N c_n m_n \quad (4)$$

при умові

$$\sum_{n=1}^N t_n m_n = T; \quad m_n \geq 0,$$

де λ – множник Лагранжа.

Використання методу Лагранжа, показаного стосовно БПЛА в Y. Zhang and J. Li et al (2015) [20], дозволяє зменшити розмірність і тому задача (4) незрівнянно простіша початкової.

Апріорі величина λ невідома, і тому задачу (4) доводиться вирішувати при декількох довільних значеннях λ . Оптимальне рішення задачі (4) буде залежати від λ :

$$m_{opt} = m_n^o(\lambda) \quad (n = 1, \dots, N).$$

Якщо знайдене рішення $m_n^o(\lambda)$ відповідає обмеженню (3), то воно є шуканим рішенням задачі (1). В іншому випадку значення λ треба корегувати. Зокрема, якщо з'ясується, що $\sum_{n=1}^N c_n m_n^o(\lambda) > C$, то необхідно збільшувати λ .

Для швидкого визначення λ може бути застосований метод послідовних наближень. Якщо для значень λ_1, λ_2 знайдені оптимальні рішення $m_1^i(\lambda_1), m_2^i(\lambda_2)$ то на наступному кроці отримуємо λ_3 з формули

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{h_2 - h_1} (C - h_1) + \lambda_1,$$

де

$$h_2 = \sum_{n=1}^N c_n m_n^i(\lambda_2); \quad h_1 = \sum_{n=1}^N c_n m_n^i(\lambda_1).$$

Оскільки в задачі (4) розглядається один вид ресурсу (C), тому необхідно ввести один параметр стану ξ_C .

Позначимо

$$\max_{m_1, \dots, m_k} \sum_{n=1}^k G_n(m_n)$$

при умові

$$\sum_{n=1}^k t_n m_n \leq \xi_T; \quad m_n \geq 0, n = 1, \dots, k.$$

через $A_k(\xi_C)$.

Тоді основне рекурентне співвідношення динамічного програмування має наступний вигляд

$$A_k(\xi_C) = \max_{m_k} [G_k(m_k) - \lambda c_k m_k + A_{k-1}(\xi_C - c_k m_k)]. \quad (5)$$

Необхідно відзначити, що метод динамічного програмування є направлений послідовний перебір варіантів, що обов'язково приводить до глобального максимуму й оптимального вирішення задачі (1).

У процесі управління роєм БПЛА при агрохімічних заходах за допомогою вищезазначеного методу для кожного етапу функціонування визначаються оптимальні значення (m_n^i) , тобто знаходиться оптимальна кількість БПЛА, необхідної для досягнення кінцевої мети (W_N) .

Вирішення цієї задачі здійснюється за допомогою спеціального автоматизованого робочого місця оператора управління (АРМ-П) СКР. Завдяки розробленому математичному апарату та програмному забезпеченню АРМ-П здійснюється визначення оптимальної кількості БПЛА, тобто формування за допомогою АРМ-П у визначеній часовій послідовності оптимального плану функціонування кожного БПЛА для відпрацювання завдань ХЗР.

У процесі функціонування СКР, доки мета не досягнута, здійснюється така послідовність дій:

- відповідно до оптимального плану здійснюється планування для поетапного відпрацювання завдань агрохімічних заходах такого набору БПЛА, при якому забезпечується досягнення максимального значення

$$(A_n(\xi_n));$$

- на основі порівняння поточного значення якості виконання типових завдань з необхідним $(A_n(\xi_n))$ приймається рішення про подальший хід виконання завдань агрохімічних заходів. Якщо поточне значення якості не нижче необхідного – виконання завдань агрохімічних заходів Р продовжується відповідно до оптимального плану.

В інших випадках, залежно від досягнутого значення якості на n -му етапі, виникає необхідність в адаптивній зміні (повторній оптимізації) плану виконання агрохімічних заходів. З цією метою за допомогою вищезазначеного методу для кожного етапу (починаючи з n -го) робіт агрохімічні заходи забезпечується

формування оптимального плану з урахуванням поточного значення якості (кількості обробленої біомаси ЕК отрутохімікатами та добривами), обмежень по вартості та відведеного залишку часу.

Структурна схема рішення задачі оптимального управління роєм БПЛА показана на рис. 1.

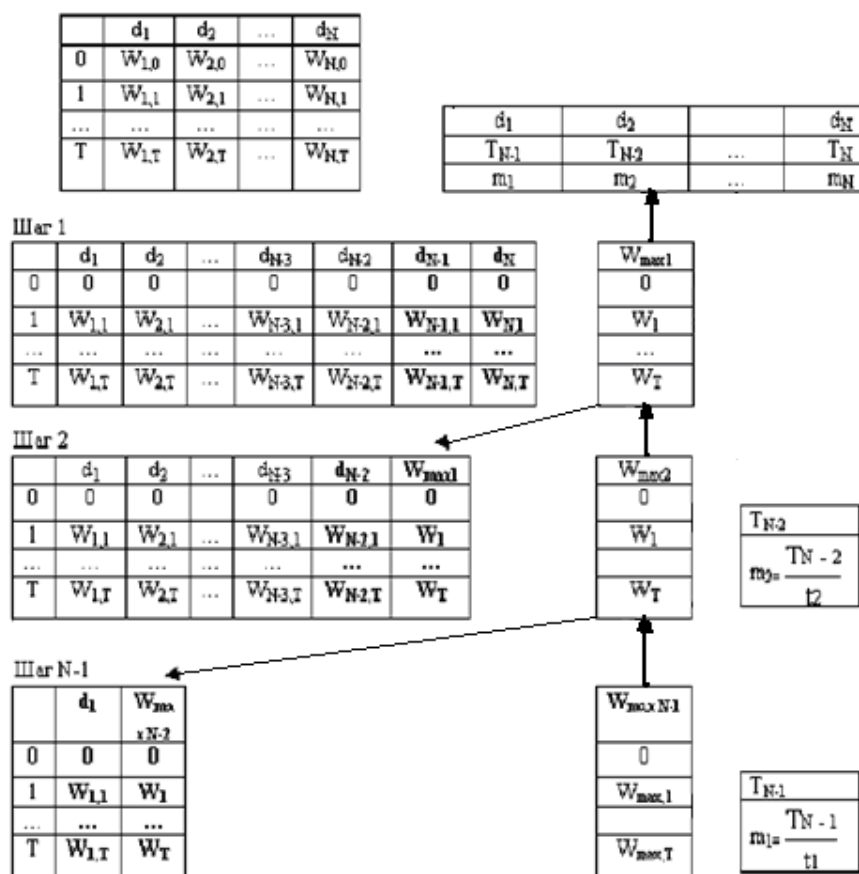


Рис. 1. Структурна схема рішення задачі оптимізації управління роєм БПЛА

Процес планування завдань на ХЗР за часовими інтервалами розбивається на ряд кроків: перший крок - призначення завдань ХЗР на N -й інтервал, другий крок – призначення завдань ХЗР на $(N-1)$ -й інтервал, n -й крок – планування завдань на ХЗР на k -й інтервал, останній крок - планування завдань ХЗР на перший інтервал.

Оптимізація починається з останнього інтервалу. На кожному наступному кроці визначаються всі можливі варіанти розподілу завдань на ХЗР між БПЛА та проводиться розрахунок цільової функції. Максимальне значення цільової функції

відповідає оптимальному розподілу БПЛА між ділянками ЕК на даному етапі. Ці значення і записуються у відповідні рядок і стовпець матриці розподілу.

При розподілі завдань ХЗР на першому інтервалі можлива єдина ситуація, коли для розподілу типових завдань ХЗР є в наявності увесь ресурс БПЛА. Максимальне значення цільової функції і відповідні їй тип завдань ХЗР і число їх повторень, розподілених на цьому кроці, записуються в останній стовпець останнього рядка матриці розподілу.

У результаті отримуємо матрицю розподілу, що містить безліч умовно оптимальних варіантів розподілу завдань БПЛА для ХЗР на кожному часовому інтервалі. На цьому закінчується перше коло оптимального розподілу завдань БПЛА для ХЗР.

На другому колі відповідно до методу динамічного програмування аналізується отримана матриця розподілу. При цьому з останнього рядка останнього стовпчика матриці розподілу витягується значення $d(1,T)$, $m(1,T)$ і перетворюється в значення $D_{mc}(1)$. Це значення свідчить про те, що для планування на перший часовий інтервал виділені БПЛА $d(1,T)$, при цьому необхідне число типових завдань ХЗР для їх відпрацювання становить $m(1,T)$. Отже, для планування на наступних часових інтервалах залишилося $[T - m_1(1,T)t_1(d(1,T))]$ часу і це ж значення буде рядком для визначення типових завдань ХЗР і часу їх відпрацювання (числа циклів ЗР) на другому інтервалі (етапі) планування. З другого стовпця і з вже розрахованого рядку витягується значення $d(2,T)$, $m(2,T)$ і перетворюється в $D_{mc}(2)$. Такі процедури проводяться до закінчення стовпців, тобто часових інтервалів планування. В результаті, отримуємо таблицю D_{mc} (див. рис. 1), аналіз якої показує, які БПЛА (або їх комбінації) і з якою необхідною кількістю відпрацьовують завдання на ХЗР та який час вони повинні працювати на кожній з ділянок поля.

Введення множників Лагранжа в процес оптимізації розподілу рою БПЛА між ділянками поля дозволяє враховувати вартісні обмеження на вартісні затрати під час планування робіт з агрохімічної обробки рослин.

Таким чином, при використанні розробленого методу оптимального управління роєм БПЛА при обприскуванні енергетичних культур агрохімічними засобами в системі управління забезпечується підвищення якості ХЗР при обмеженнях на часові та вартісні витрати.

Висновки і перспективи.

1. Обґрунтовано постановку задачі оптимізації, яка полягає у визначенні оптимальної кількості БПЛА для кожної ділянки поля, при якій забезпечується обприскування максимальної кількості рослин з урахуванням обмежень на часові й вартісні витрати на виконання завдань агрохімічної обробки рослин.

2. Розроблено метод оптимального управління роєм БПЛА при обприскуванні енергетичних культур агрохімічними засобами, який заснований на використанні процедури динамічного програмування, що забезпечує вирішення завдань щодо максимізації кількості оброблених рослин на кожній ділянці поля при обмеженнях на часові та вартісні витрати.

3. Запропонована структурна схема рішення задачі оптимізації управління роєм БПЛА, за допомогою якої у спеціальному програмному забезпеченні автоматизованого робочого місця оператора управління СКР визначається оптимальна кількість БПЛА у визначеній часовій послідовності для якісного відпрацювання завдань агрохімічних заходів.

References

1. P. Pochwatka et al. (2020). "Energetic and Economic Aspects of Biogas Plants Feed with Agriculture Biomass," 2020 4th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, 2020, 130-133, doi: 10.1109/ICGEA49367.2020.239705.
2. S. Szewczuk (2015)/ "Biogas as a fuel source for the transport sector," 2015 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), Cape Town, South Africa, 256-262, doi: 10.1109/ICUE.2015.7280276.
3. Carolina Boix-Fayos, Joris de Vente (2023). "Challenges and potential pathways towards sustainable agriculture within the European Green Deal", Agricultural Systems, 207, 103634, doi: 10.1016/j.agsy.2023.103634
4. M. Tropea and A. Serianni (2020). "Bio-Inspired Drones Recruiting Strategy for Precision Agriculture Domain," 2020 IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT), Prague, Czech Republic, 1-4, doi: 10.1109/DS-RT50469.2020.9213516.

5. Guven and M. Parlak (2022). "Blockchain, AI and IoT Empowered Swarm Drones for Precision Agriculture Applications," 2022 IEEE 1st Global Emerging Technology Blockchain Forum: Blockchain & Beyond (iGETblockchain), Irvine, CA, USA, 1-6, doi: 10.1109/iGETblockchain56591.2022.10087152.
6. Jiguang Zhang, Shilin Xu, Yong Zhao, Jiayi Sun, Shibiao Xu, Xiaopeng Zhang (2023). "Aerial orthoimage generation for UAV remote sensing: Review", Information Fusion, 89, January 2023, 91-120, doi: 10.1016/j.inffus.2022.08.007.
7. Guobin Wang, Yuxing Han, Xuan Li, John Andaloro, Pengchao Chen, W. Clint Hoffmann, Xiaoqiang Han, Shengde Chen, Yubin Lan (2020). "Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer", Science of The Total Environment, 737, 1 October 2020, 139793, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139793
8. D. Karabetsky and V. Sineglazov (2018). "Analysis of Solar Rechargeable Airplane," 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 16-19, doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576181.
9. D. Karabetsky and V. Sineglazov (2019). "Conceptual Design of Solar Rechargeable Airplane," 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kiev, Ukraine, 17-20, doi: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943929.
10. A. Godny and V. Sineglazov (2018). "Integrated Navigation Complex Design System," 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 258-261, doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576291.
11. M. G. Lutsky, V. M. Sineglazov and V. S. Ishchenko (2021). "Suppression of Noise in Visual Navigation Systems," 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD), Kyiv, Ukraine, 7-10, doi: 10.1109/APUAVD53804.2021.9615405.
12. N. A. Pasichnyk, D. S. Komarchuk, O. A. Opryshko, S. A. Shvorov and N. A. Kiktev (2021). "Methodology for Software Assessment of the Conformity of Atmospheric Correction from the UAV's Zenith Sensor," 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD), Kyiv, Ukraine, 1-5, doi: 10.1109/APUAVD53804.2021.9615177.
13. D. Komarchuk et al. (2020). "Algorithms and Software for UAV Flight Planning for Monitoring the Stress Conditions of Plantations," 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 146-149, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255605.
14. Y. A. Gunchenko, S. A. Shvorov, N. D. Rudnichenko and V. D. Boyko (2016). "Methodical complex of accelerated training for operators of unmanned aerial vehicles," 2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 130-133, doi: 10.1109/MSNMC.2016.7783124.
15. D. S. Komarchuk, Y. A. Gunchenko, N. A. Pasichnyk, O. A. Opryshko, S. A. Shvorov and V. Reshetiuk (2021). "Use of Drones in Industrial Greenhouses," 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles

Development (APUAVD), Kyiv, Ukraine, 184-187, doi: 10.1109/APUAVD53804.2021.9615418.

16. J. S. Alatas, K. Priandana, M. K. Dewi Hardhienata and Wulandari (2022). "Implementation of Cloud-Based Drone Navigation for Swarm Robot Coordination," 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS), Surabaya, Indonesia, 152-161, doi: 10.1109/AGERS56232.2022.10093315.

17. A. Wu, R. Yang, H. Li and M. Lv (2023). "A Specified-Time Cooperative Optimal Control Approach to Unmanned Aerial Vehicle Swarms," 2023 9th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Beijing, China, 163-169, doi: 10.1109/ICCAR57134.2023.10151706.

18. S. Mian, J. Hill and Z. -H. Mao (2020). "Optimal Control Techniques for Heterogeneous UAV Swarms," 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Antonio, TX, USA, 1-10, doi: 10.1109/DASC50938.2020.9256688.

19. X. Qiu et al. (2021). "On Dynamic Target Assignment Method of UAV Swarms Based on Cost Minimization," 2021 IEEE 10th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), Suzhou, China, 830-835, doi: 10.1109/DDCLS52934.2021.9455466.

20. Y. Zhang and J. Li (2015). "Online motion planning for UAVs with multi-constraints using C/GMRES method," 2015 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, Poland, 529-534, doi: 10.1109/MMAR.2015.7283931.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF OPTIMAL SWARM MANAGEMENT OF UAVS IN ENERGY CROP SPRAYING WITH AGROCHEMICAL AGENTS

S. Shvorov, N. Pasichnyk, O. Opryshko, V. Yakushov, M. Redko, T. Davidenko

Abstract. *The work is devoted to research on the optimal management of a UAV swarm when spraying energy crops with toxic chemicals. The relevance of the work lies in the fact that, at present, the solution of chemical plant protection tasks using UAVs is based on the individual experience of a human operator, who manages a swarm of UAVs, as a rule, in a non-optimal way with significant time and cost costs. The purpose of the article is to develop methodological principles for optimal management of a UAV swarm when spraying energy crops with agrochemicals. In order to achieve the goal, the following tasks must be solved: the formulation of the task of optimizing the management of a UAV swarm is substantiated, taking into account the time and cost constraints for the performance of chemical plant protection tasks, a method of optimal management of a UAV swarm when spraying energy crops with toxic chemicals and foliar feeding is developed, which provides a solution tasks to maximize the number of sprayed plants in each field section under time and cost constraints, a structural diagram of the solution to the task of optimizing the UAV swarm management was developed for the high-quality practice of chemical plant protection tasks. The scientific novelty of the work consists in the application of the dynamic programming method in the distribution and management of a swarm of UAVs on each site when spraying energy crops with agrochemicals. The*

practical value of the work lies in the development of a structural scheme for solving the problem of optimizing the control of a UAV swarm, with the help of which the optimal number of UAVs in a given time sequence is calculated in special software. automated operator's workplace for high-quality performance of chemical protection and plant nutrition tasks.

Key words: *UAV swarm, optimal control, plant spraying, dynamic programming method*