

І. В. Гуменюк, Д. А. Рибчинський

ФОРМАЛІЗОВАНА ПОСТАНОВКА НАУКОВОГО ЗАВДАННЯ З ОПТИМІЗАЦІЇ ПОЛЬОТУ ТА УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПОВІТРЯНИХ РЕТРАНСЛЯТОРІВ

У статті обґрунтовано та доведено необхідність розроблення математичного забезпечення наявних і перспективних зразків озброєння та військової техніки, а саме безпілотних авіаційних комплексів I класу з оптимізації польоту та управління під час використання ретрансляторів на основі безпілотних літальних апаратів, які використовують для вирішення завдань інформаційно-розвідувального забезпечення військ (сил) Збройних Сил України. Встановлено, що застосування таких комплексів забезпечує інформаційну та вогневу перевагу над противником під час проведення повітряної розвідки, ураження його сил та засобів тощо. Виходячи із цих передумов, у публікації здійснено формалізовану постановку важливого наукового завдання, яке полягає в підвищенні ефективності безпілотних авіаційних комплексів I класу за рахунок оптимізації маршруту польоту, топології мережі та енергоефективного управління з використанням ретрансляторів на основі безпілотних літальних апаратів. Автори для визначення ефективності безпілотних авіаційних комплексів запропонували комплексний показник багатокритерійної оптимізації нелінійної схеми компромісів, який залежить від значень імовірності ураження комплексу, його бойового радіуса та живучості. Подано структурно-логічну схему проведення дослідження, яка містить розв'язання таких частинних завдань: аналіз застосування тактичних безпілотних авіаційних комплексів I класу, ретрансляторів на базі безпілотних літальних апаратів та методів їх маршрутизації, а також способів планування оптимальних маршрутів їх польоту на основі алгоритмів розв'язання транспортної задачі; оптимізація маршруту польоту безпілотних авіаційних комплексів I класу для обходу зон їх ураження; енергоефективне застосування тактичних безпілотних авіаційних комплексів на основі ретрансляторів. Кінцевим науковим результатом є розроблене математичне забезпечення безпілотних авіаційних комплексів I класу та перевірка його працездатності. Наведена структурно-логічна схема дозволяє систематизувати сутність та зміст проведення наукового дослідження.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс; повітряний ретранслятор; ефективність; оптимізація; багатокритерійне оцінювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сьогоднішній день невід'ємною складовою сучасних збройних конфліктів є активне використання безпілотної авіації. Як свідчить досвід ведення бойових дій під час героїчної відсічі збройної агресії російської федерації (рф), на сьогодні спостерігається стійка тенденція щодо зростання значущості застосування безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) [1], зокрема для ведення повітряної

розвідки, ураження сил та засобів противника, коригування вогню артилерії, визначення результатів виконання вогневих завдань тощо.

У разі оцінювання бойової ефективності БпАК, їх формувань або угруповань необхідно враховувати специфічні особливості складу, способів застосування цих комплексів, льотно-технічних характеристик і експлуатаційних обмежень безпілотних літальних апаратів (БпЛА) [2]. Водночас стрімкий технологічний розвиток разом із удосконаленням тактики застосування такого класу озброєння обумовлює взаємну та швидку модернізацію засобів протидії їм. За цих умов противник удосконалює наявні та розробляє нові контрзасоби протидії. Саме тому завдання щодо підвищення ефективності БпАК є своєчасним, важливим та необхідним для досягнення збройної переваги над ворогом. Виходячи з окреслених передумов, сформовано мету статті, яка полягає у формалізації наукового завдання з оптимізації польоту та управління БпАК під час використання повітряних ретрансляторів на основі БпЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні вже розроблено та реалізовано низку сучасних методів оцінювання та забезпечення відповідного рівня ефективності БпАК, зокрема під час реалізації групового застосування. Наприклад, у [2] запропоновано методичний підхід до визначення бойових потенціалів комплексів, їх підрозділів і угруповань, який, на відміну від чинних методик оцінювання ефективності пілотованої авіації, враховує специфічні особливості сучасних БпАК. У [3, 4] автори розробили методи бойового застосування групи БпЛА військового призначення в системі “група БпЛА – засоби протидії противника – ціль застосування – середовище”, а також обґрунтували перспективність комбінування методів сучасної теорії управління та технологій штучного інтелекту для створення системи їх управління. У [5] розглянуто інноваційні підходи, з-поміж яких: генеративний дизайн, алгоритми керування роєм, комп’ютерний зір і методи інформаційно-екстремального навчання, – що сприяють розширенню функціональних можливостей БпЛА. Отримані в [6] результати, які полягають у комплексному підході до питання покращення ефективності повітряної розвідки, можуть бути використані для розроблення новітніх розвідувальних БпЛА та удосконалення наявних для оцінювання ефективності ведення повітряної розвідки.

Отже, результати аналізу науково-практичних джерел свідчать про те, що для вирішення завдань покращення бойового застосування БпАК, зокрема з використанням ретрансляторів, розроблено достатню кількість науково-методичного та практичного забезпечення. Проте підвищенню ефективності БпАК за рахунок оптимізації маршруту польоту, топології мережі та енергоефективного управління в науковій літературі не присвячено належної уваги.

Формулювання завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно формалізувати наукове завдання, яке полягає в підвищенні ефективності БпАК із потужністю приймально-передавального пристрою комплексу $E_{\text{випр}}$, кількістю ретрансляторів на базі БпЛА $N_{\text{ретр}}$ та об’єктів розвідки (ОР) $N_{\text{ор}}$:

$$E_{\text{БпАК}}^* (P_{\text{ураж}}, R_{\text{БпАК}}, Rel) \rightarrow \max \quad (1)$$

за рахунок зниження ймовірності його ураження $P_{\text{ураж}}(t_n)$, збільшення бойового радіуса $R_{\text{БпАК}}(N_{\text{ретр}})$ та підвищення живучості $Rel(E_{\text{випр}}, t_n)$ із часом польотного завдання t_n .

Обмеження та припущення: глибина району ведення розвідки становить 45–50 км, попередньо відомі місця розташування засобів вогневого ураження, радіолокаційні станції радіоелектронного подавлення та засоби контрбатареїної боротьби противника. Кількість ретрансляторів – до 5-6 БпЛА. ОР отримані за допомогою проведення попереднього моніторингу та є вхідними даними для планування маршруту польоту комплексу.

Виклад основного матеріалу. Від початку повномасштабного вторгнення застосування розвідувальних БпАК Силами безпеки й оборони України суттєво покращило ситуаційну обізнаність та підвищило ефективність застосування їх підрозділів.

На сьогодні спостерігається тенденція, коли кількість виявлених та підтверджених цілей переважає спроможність їх уражати. Окрім цього, під час оцінювання ефективності вогневого ураження з'являється оперативна можливість доураження цілі або переведення вогню на іншу ціль [7]. Однак противник усе ж таки має високий рівень успішності протидії розвідувальним та ударним БпАК. Це зумовлено насамперед недосконалістю (відсутністю) засобів автоматизації формування маршрутів польоту та забезпечення надійності зв'язку під час виконання польотних завдань. Ефективність зразків комплексів, які знаходяться на озброєнні та застосовуються підрозділами (військами), істотно знижується, оскільки їх математичне забезпечення не відповідає сучасним вимогам.

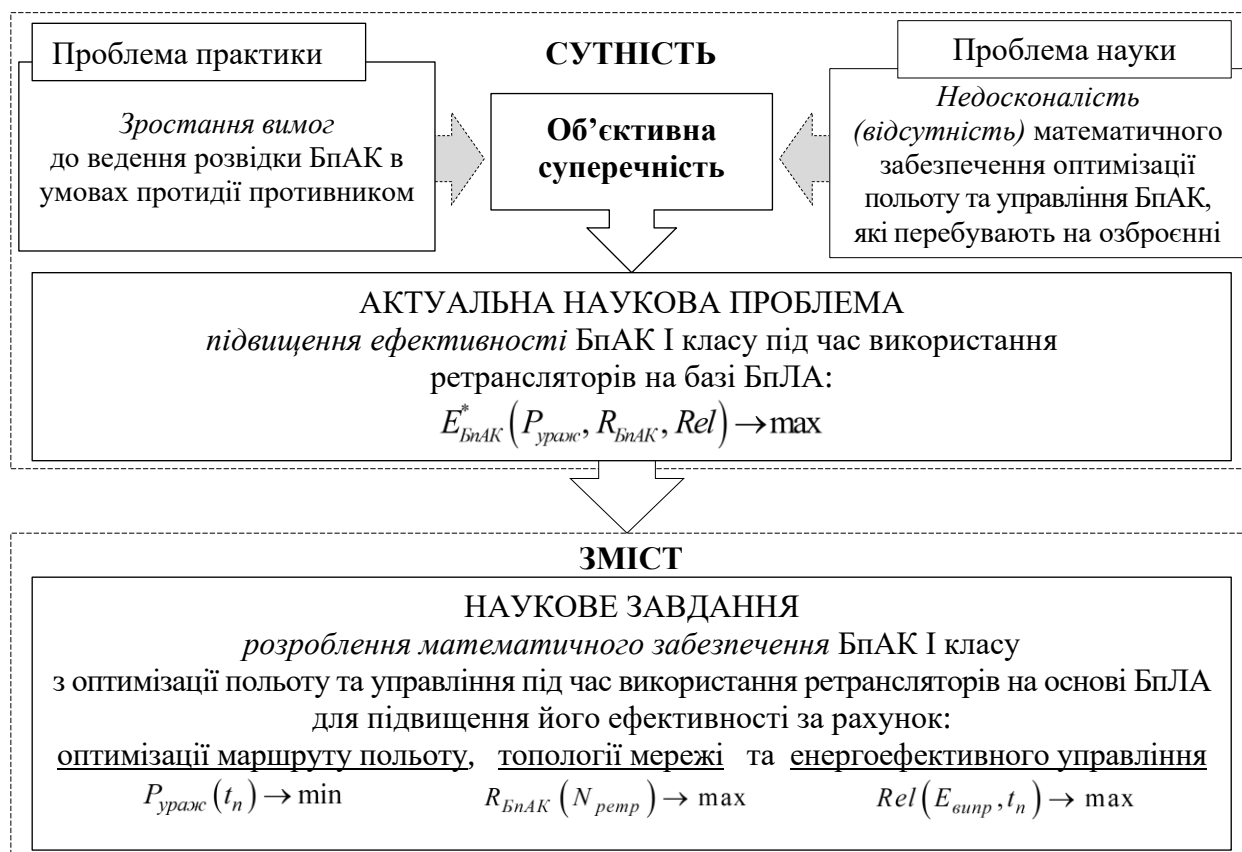


Рис. 1. Сутність і зміст наукового завдання

Крім того, функціональні та бойові можливості БпАК обмежені льотно-технічними та енергетичними характеристиками. Отже, на сьогодні є об'єктивна суперечність між недосконалістю (відсутністю) математичного забезпечення наявних зразків та вимогами з ведення розвідки на сучасному етапі (див. рис. 1).

Враховуючи класичне визначення ефективності як співвідношення результату або ефекту виконання завдання зразком озброєння (комплексом) до витрат, у статті під ефективністю БпАК будемо розуміти комплексний показник (1) багатокритерійної оптимізації нелінійної схеми компромісів [8]:

$$E_{\text{БпАК}}^* = \arg \max \begin{cases} P_{\text{ураж}}(t_n) \rightarrow \min; \\ R_{\text{БпАК}}(N_{\text{репр}}) \rightarrow \max; \\ \text{Rel}(E_{\text{випр}}, t_n) \rightarrow \max, \end{cases} \quad (1)$$

значення якого залежить від імовірності його ураження, бойового радіуса та живучості.

Отже, $E_{\text{БпАК}}^* \in [0;1]$ розглядаємо як інтегральний параметр, який відображає оптимальний баланс між затратами ресурсів $\{E_{\text{випр}}, N_{\text{репр}}, t_n\}$ та досягнутими операційними результатами $\{P_{\text{ураж}}, R_{\text{БпАК}}, \text{Rel}\}$. У разі багатокритерійного оцінювання альтернатив виникає необхідність отримання не тільки аналітичної (кількісної), а й якісної оцінки. Із цією метою для отриманого значення ефективності БпАК необхідно провести його нормування та визначити відповідність нормованій фундаментальній шкалі. Інтервальну нормовану шкалу показника $E_{\text{БпАК}}^*$ наведено в табл. 1, у якій показано залежність його якісних властивостей і відповідних кількісних оцінок (значень).

Таблиця 1

Інтервальна нормована шкала ефективності БпАК

Категорія якості	Інтервали нормованої фундаментальної шкали	Ступінь оптимальності (неоптимальне / оптимальне)
Незадовільна	0,0–0,2	Неоптимальне
Низька	0,2–0,4	
Задовільна	0,4–0,5	На межі невизначеності
Добра	0,5–0,7	
Висока	0,7–1,0	Оптимальне

Для вирішення наукового завдання (див. рис. 1) побудовано структурно-логічну схему проведення дослідження (рис. 2), яка дозволяє систематизувати зміст проведення кожного етапу та розв'язання частинних завдань.

Коротко розглянемо всі етапи. Для розв'язання першого частинного завдання необхідно проаналізувати: застосування БпАК І класу в ході бойових дій; протидію застосуванню комплексу противником; способи планування оптимальних маршрутів польоту БпЛА на основі алгоритмів розв'язання транспортної задачі; застосування повітряних ретрансляторів і методів їх маршрутизації.

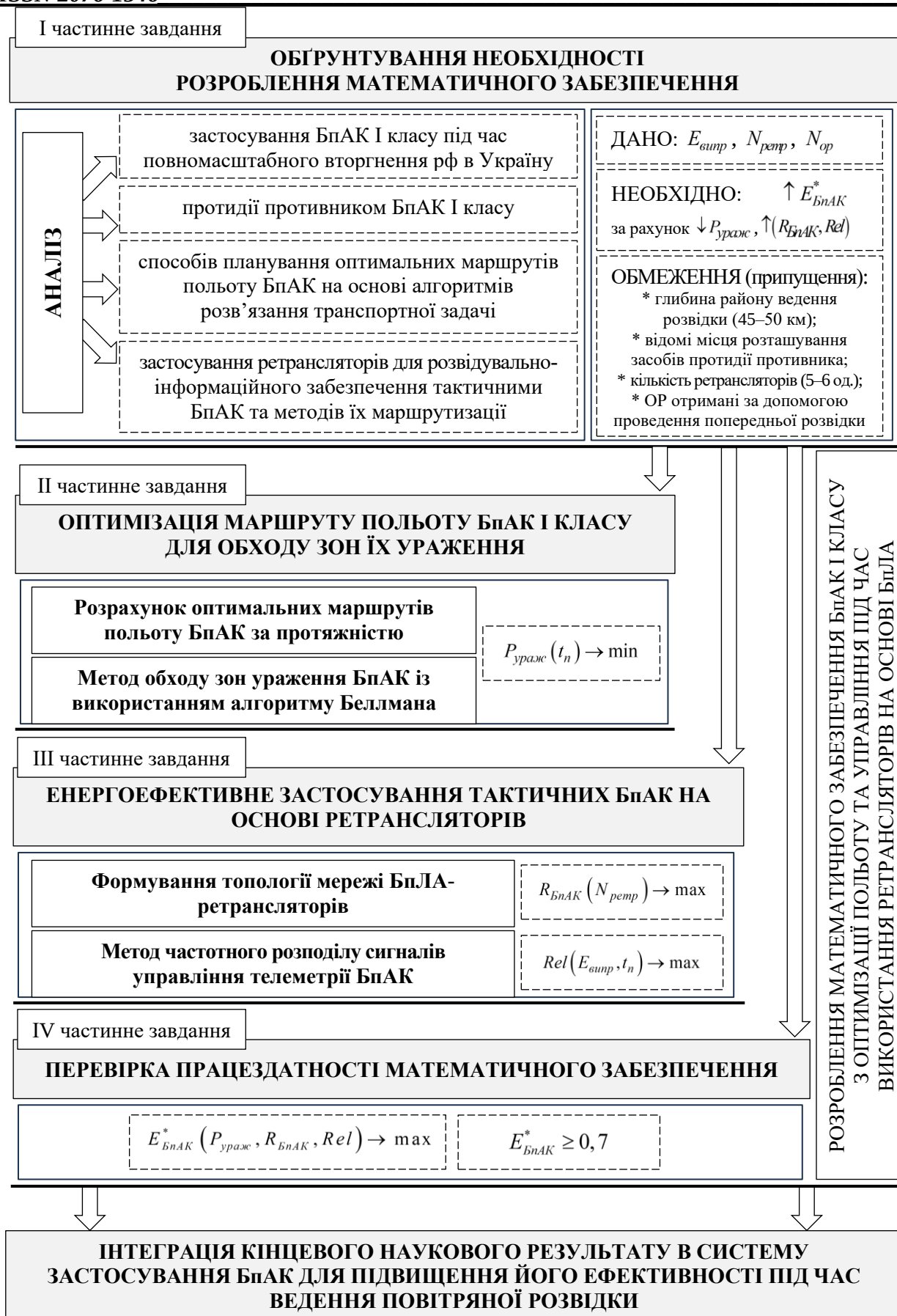


Рис. 2. Структурно-логічна схема проведення дослідження

Результатом цього етапу є обґрунтування та доведення необхідності розроблення відповідного математичного забезпечення, а також постановка завдання наукового дослідження.

Друге частинне завдання – розроблення методу оптимізації маршруту польоту БпАК, що забезпечуватиме зниження ймовірності його ураження. Деталізуємо порядок його розв’язання.

Вхідними даними є ОР (рис. 3а), одержані під час проведення попереднього моніторингу. Для пошуку оптимального маршруту застосовувався генетичний алгоритм з урахуванням його переваг, отриманих у результаті аналізу (рис. 3б).

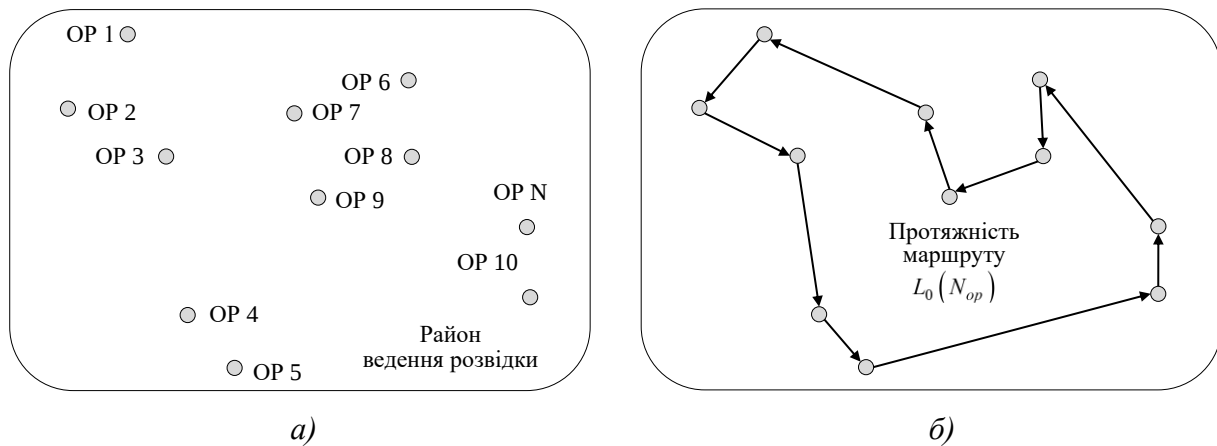


Рис. 3. Пошук маршруту за допомогою генетичного алгоритму:
а) вхідні дані; б) результат

Із метою оптимізації маршруту для ОР виконується їх кластеризація за метрикою зони охоплення БпЛА (рис. 4а) з урахуванням висоти його польоту та кута огляду (рис. 4б).

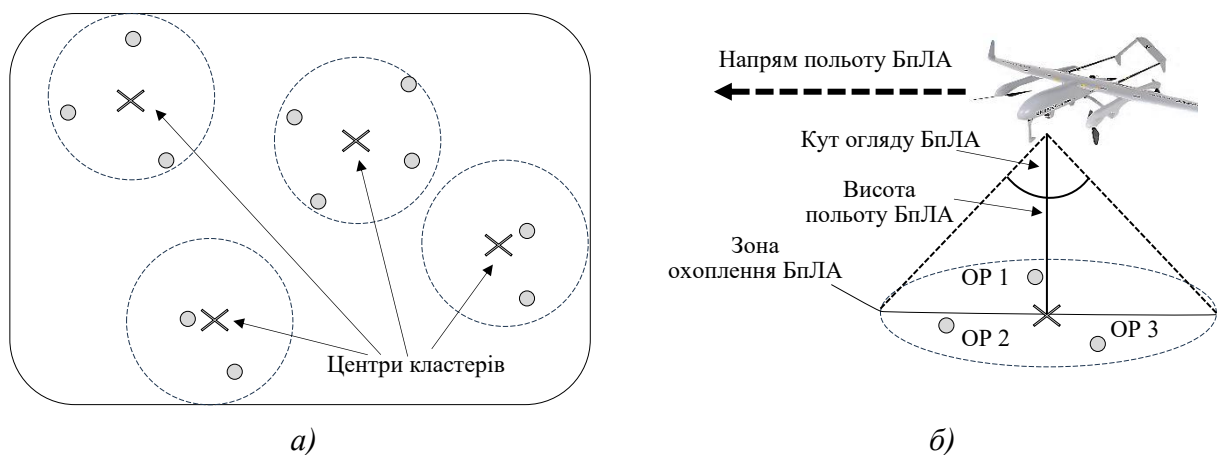


Рис. 4. Кластеризація ОР: а) результат; б) пояснення сутності

Потім пошук маршруту здійснюється за центрами отриманих кластерів (рис. 5а).

Виходячи із визначених для виконання завдання обмежень та припущень, а саме наявності інформації щодо місць розташування засобів протидії противника БпАК,

а також їх тактико-технічних характеристик, визначаємо небезпечні зони для виконання польотного завдання [9]. За таких умов прокладається новий маршрут польоту шляхом їх обходу. Найефективнішим рішенням у цьому разі є пошук оптимального маршруту за допомогою алгоритму Беллмана (рис. 5б).

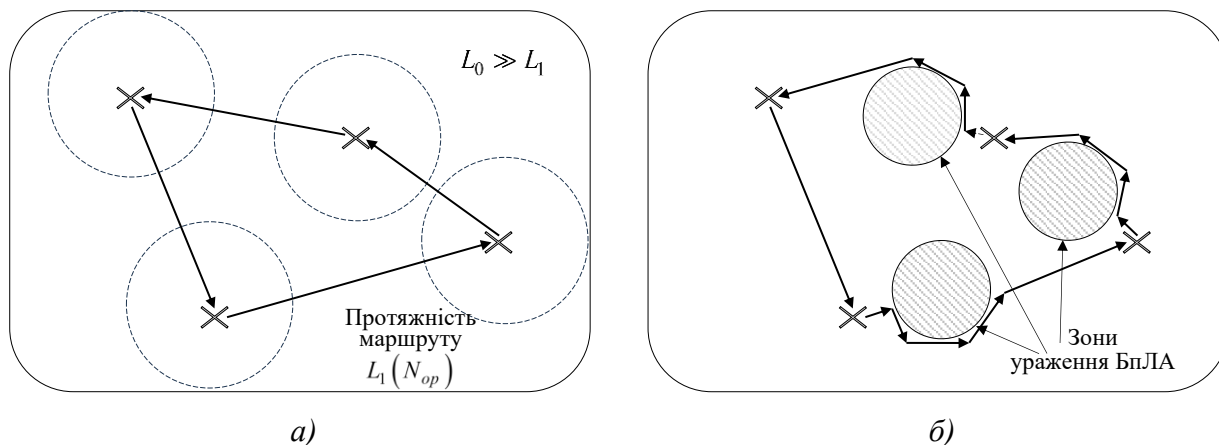


Рис. 5. Пошук маршруту: а) із використанням генетичного алгоритму за центрами кластерів; б) за алгоритмом Беллмана для обходу зон ураження

Досягнутий результат розв'язання частинного завдання шляхом розрахунку оптимальних маршрутів польоту БпАК із використанням генетичного алгоритму за центрами кластерів, а також завдяки обходу зон ураження дозволить суттєво зменшити протяжність маршруту (час польоту) та, відповідно, знизити ймовірність ураження комплексу.

Наступним частинним завданням є енергоефективне застосування тактичних БпАК, яке включає в себе формування топології мережі БпЛА-ретрансляторів (рис. 6) та розроблення методу частотного розподілу сигналів управління телеметрії комплексу (рис. 7).

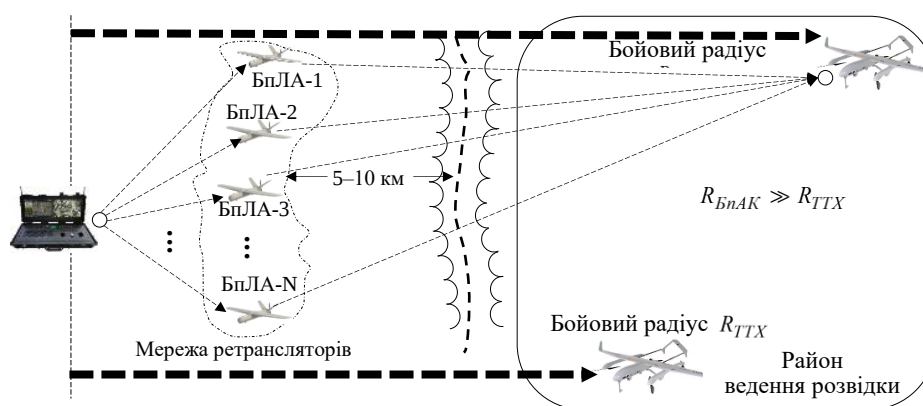


Рис. 6. Формування топології мережі БпЛА-ретрансляторів

Формування топології мережі ретрансляторів на основі БпЛА здійснюється для забезпечення стійкого та ефективного зв'язку в умовах складного рельєфу місцевості, великих відстаней і активної радіоелектронної протидії противником. Використання

такого підходу дозволить значно збільшити значення бойового радіуса $R_{\text{БпАК}}$ порівняно з тактико-технічними характеристиками комплексу.

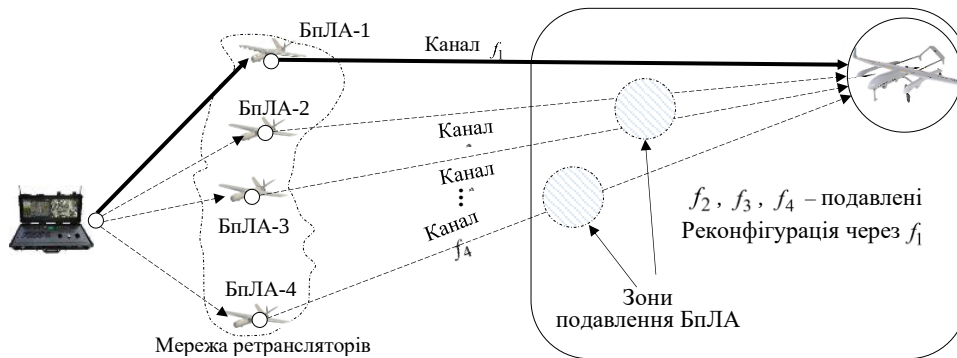


Рис. 7. Варіант частотного розподілу сигналів управління БпЛА

На рис. 7 наведено варіант частотного розподілу сигналів управління БпЛА. За умови успішного подавлення частот управління БпЛА ($f_2, f_3, \dots, f_4$) противником, виконується реконфігурація мережі зв'язку “БпЛА – ретранслятор – наземна станція управління” з використанням відомих алгоритмів та протоколів маршрутизації. У цьому разі найближчим за відстанню до розвідувального БпАК та енергетичнодоступним ретранслятором є БпЛА-1 з каналом зв'язку на частоті f_1 . Запропонований підхід дозволить мінімізувати потужність сигналів, зменшити енергоспоживання БпЛА-ретранслятора та розвідувального БпАК, що, у свою чергу, забезпечить підвищення живучості комплексу.

Отже, наведена в статті схема демонструє ефективний підхід до вирішення важливого наукового завдання, яке полягає в розробленні математичного забезпечення БпАК I класу з оптимізації польоту та управління під час використання ретрансляторів на основі БпЛА для підвищення його ефективності.

Висновки. У статті наведено формалізовану постановку наукового завдання з оптимізації польоту та управління БпАК під час використання ретрансляторів на основі БпЛА, яке є сучасним, необхідним, важливим та практичним. Для підвищення ефективності БпАК I класу запропоновано математичне забезпечення, структурно-логічна схема якого містить розв'язання таких частинних задач: оптимізація маршруту польоту комплексу для обходу зон його ураження, енергоефективне застосування БпАК на основі ретрансляторів БпЛА. Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення відповідного математичного забезпечення для реалізації поставленого в цій публікації наукового завдання та досягнення відповідної мети.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Правила виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України : наказ Міністерства оборони України від 08.12.2016 № 661. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text> (дата звернення: 10.03.2025).

2. Шалигін А. А., Нерубацький В. О., Смик С. І. Методичний підхід до оцінки бойових потенціалів безпілотних авіаційних комплексів, їх підрозділів і угруповань // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 2 (43). С. 73–79. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.10>
3. Kharchenko O. V., Artushin L. M., Kononov O. A. Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles // 36. наук. праць ДНДІА. 2022. Вип. 18 (25). С. 42–47. <https://doi.org/10.54858/dndia.2022-18-1>
4. Артюшин Л. М., Кононов О. А., Невзгляденко Ю. О. Аналіз перспектив реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів військового призначення // 36. наук. праць ДНДІА. 2023. Вип. 19 (26). С. 42–47. <https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-5>
5. Вадіс Д., Аврутов В. Методи підвищення функціональної ефективності БПЛА // Механіка гіроскопічних систем. 2024. № 48. С. 55–68. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891>
6. Застосування безпілотних авіаційних комплексів в інтересах розвідувального забезпечення / В. М. Феденько та ін. // Актуальні питання випробувань та сертифікації озброєння та військової техніки. 2024. № 2 (4). С. 56–62. <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.07>
7. Волошин І. І., Луцевят О. І., Васильченко Д. О. Ефективність застосування безпілотних авіаційних комплексів у сучасних військових конфліктах // Повітряна міць України. 2024. № 1 (6). С. 93–98. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-93-98>
8. Multicriteria Optimization of Dynamic Control Systems / A. M. Voronin, Yu. K. Ziatdinov, O. Y. Permiakov, I. D. Varlamov // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2014. № 2 (20). С. 38–48. [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-2\(20\)-38-48](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-2(20)-38-48)
9. Humeniuk I., Vorotnikov V., Pozdniakov P. Models of Conflicts in Motion Control Small UAV // The Advanced Science Journal. 2016. Iss. 3. P. 63–72. <https://doi.org/10.15550/ASJ.2016.03.063>

Стаття надійшла до редакції 31.03.2025.

REFERENCES

1. *Pravyla vykonannia polotiv bezpilotnymy aviatsiinymy kompleksamy derzhavnoi aviatsii Ukrainy : nakaz Ministerstva oborony Ukrainy vid 08.12.2016 № 661* [Rules for Performing Flights with Unmanned Aerial Systems of the State Aviation of Ukraine : order of the Ministry of Defense of Ukraine from December 8, 2016, № 661]. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text> [in Ukrainian].
2. Shalyhin, A. A., Nerubatskyi, V. O., & Smyk, S. I. (2021). Metodychnyi pidkhid do otsinky boiovykh potentsialiv bezpilotnykh aviatsiinnykh kompleksiv, yikh pidrozdiliv i uhrupovan [Methodical approach to assessing the combat potential of unmanned aerial systems, their units and groups]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy* [Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine], 2 (43), 73–79. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.10> [in Ukrainian].

3. Kharchenko, O. V., Artushin, L. M., & Kononov, O. A. (2022). Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles. *Collection of Scientific Works of SRIA*, 18 (25), 42–47. <https://doi.org/10.54858/dndia.2022-18-1>
4. Artiushyn, L. M., Kononov, O. A., & Nevzghliadenko, Yu. O. (2023). Analiz perspektyv realizatsii hrupovoho zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ viiskovoho pryznachennia [Analysis of Prospects for the Implementation of Group Use of Military Unmanned Aerial Vehicles]. *Zb. nauk. prats DNDIA [Collection of scientific papers of SRIA]*, 19 (26), 42–47. <https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-5> [in Ukrainian].
5. Vadis, D., & Avrutov, V. (2024). Metody pidvyshchennia funktsionalnoi efektyvnosti BPLA [Methods for increasing the functional efficiency of UAVs]. *Mekhanika hiroskopichnykh system [Mechanics of Gyroscopic Systems]*, 48, 55–68. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891> [in Ukrainian].
6. Fedenko, V. M. et al. (2024). Zastosuvannya bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv v interesakh rozviduvalnoho zabezpechennia [Application of Unmanned Aerial Systems in the Interests of Intelligence Support]. *Aktualni pytannia vyprobuvan ta sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [Current Issues of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment]*, 2 (4), 56–62. <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.07> [in Ukrainian].
7. Voloshyn, I. I., Lutseviat, O. I., & Vasylchenko, D. O. (2024). Efektyvnist zastosuvannya bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv u suchasnykh viiskovykh konfliktakh [Unmanned Aerial System's Efficiency of Use in Modern Military Conflicts]. *Povitriana mits Ukrainy [Air Power of Ukraine]*, 1 (6), 93–98. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-93-98> [in Ukrainian].
8. Voronin, A. M., Ziatdinov, Yu. K., Permiakov, O. Y., & Varlamov, I. D. (2014). Multicriteria Optimization of Dynamic Control Systems. *Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony [Modern Information Technologies in the Field of Security and Defense]*, 2 (20), 38–48. [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-2\(20\)-38-48](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-2(20)-38-48)
9. Humeniuk, I., Vorotnikov, V., & Pozdniakov, P. (2016). Models of Conflicts in Motion Control Small UAV. *The Advanced Science Journal*, 3, 63–72. <https://doi.org/10.15550/ASJ.2016.03.063>

I. V. Humeniuk, D. A. Rybchynskyi

STATEMENT OF THE SCIENTIFIC TASK FOR OPTIMIZING FLIGHT AND CONTROL OF UNMANNED AERIAL SYSTEMS USING AIRBORNE REPEATERS

The article substantiates and proves the necessity of developing mathematical support for existing and prospective models of weapons and military equipment, namely, class I unmanned aerial systems, for flight optimization and control using unmanned aerial vehicle-based repeaters, which are used to solve the tasks of information and reconnaissance support of troops (forces) of the Armed Forces of Ukraine. It is established that the use of such systems provides information and fire superiority over the enemy during aerial reconnaissance, engagement of their forces and assets, etc. Based on these prerequisites, the paper presents a formalized statement of an important scientific problem, which consists in increasing the efficiency of class I unmanned aerial systems by optimizing the flight route, network topology, as well as energy-

efficient control using unmanned aerial vehicle-based repeaters. The authors define "Unmanned aerial systems efficiency" as a comprehensive indicator of multi-criteria optimization of a non-linear compromise scheme, which depends on the values of the complex's probability of being hit, its combat radius, and survivability. A structural and logical scheme of the research is presented, which includes the solution of the following subtasks: analysis of the use of tactical class I unmanned aerial systems, unmanned aerial vehicle-based repeaters, and their routing methods, as well as methods of planning optimal flight routes based on transport problem solving algorithms; optimization of the flight route of class I unmanned aerial systems to bypass their engagement zones; energy-efficient use of tactical unmanned aerial systems based on repeaters. The final scientific result is the developed mathematical support for class I unmanned aerial systems and the verification of its performance. The presented structural and logical scheme allows to systematize the essence and content of the scientific research.

Keywords: *unmanned aerial system; airborne repeater; efficiency; optimization; multi-criteria evaluation.*