

DOI: 10.18372/2310-5461.40.13282

УДК 528.29(045)

Ю. Г. Даник – д-р техн. наук, проф.

Національний університет оборони України імені Івана Черняховського

e-mail: zhvinau@ukr.net

orcid.org/0000-0001-6990-8656;

І. І. Балицький – канд. техн. наук, доц.

Національна академія ДПС України імені Б. Хмельницького

e-mail: balytskyj@ukr.net

orcid.org/0000-0003-2746-2339

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОКОЛУ БЕЗПЕКИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Вступ та постановка проблеми у загальному вигляді

У сучасних умовах значного розвитку отримує застосування робототехнічних (безпілотних, безекіпажних) засобів для вирішення різноманітних завдань в інтересах забезпечення національної безпеки і оборони держави (включаючи питання охорони державного кордону) [1].

Значне поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та їх використання у різних сферах діяльності людини, активне застосування різноманітних засобів малої авіації у прикордонні, робить важливим вирішення завдання прогнозування можливих інцидентів і забезпечення безпеки польотів. І якщо для великої авіації створені відповідні системи контролю такої безпеки, для БПЛА це питання знаходиться у стадії вирішення. Тому формування теоретичних і практичних основ забезпечення безпеки польотів БПЛА є важливим і актуальним.

Уникнення статичних небезпек є порівняно простим завданням, яке вирішується з використанням відповідних існуючих методик [2]. Проте уникнення зіткнень з динамічними перешкодами є набагато більш складним завданням, вирішення якого потребує, зокрема, після виявлення потенційної перешкоди, прогнозування її руху з метою визначення ймовірності зіткнення та попередження такої події.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням безпеки польоту при використанні БПЛА присвячено значне коло сучасних досліджень. Однак більшість з них зосереджені на уникненні статичних небезпек, обумовлених складністю рельєфу місцевості та наявністю окремих статичних об'єктів (будинків, різноманітних веж та інших можливих перешкод).

Так для оцінки можливості уникнення зіткнення з статичними перешкодами в [2] використано 3D-моделювання польоту БПЛА. У дослідженні [3] вивчається питання побудови раціональних траєкторій польоту БПЛА через задані опорні точки. При цьому, як один з можливих варіантів, розглядається пересування з огинанням рельєфу місцевості.

Обмеженість маневрених можливостей БПЛА вивчалась також у [4]. При плануванні раціонального маршруту у цьому дослідженні було використано метод частково цілочисельного лінійного програмування.

Питання можливості виконання просторових маневрів БПЛА розглянуті, також, у роботі [5]. У цьому дослідженні опис польоту БПЛА проводиться з використанням динамічної моделі, представленій системою з шести диференціальних рівнянь. У праці [6] для моделювання різних траєкторій польоту при виконанні маневрів, зокрема, для обльоту перешкод, використана аналогічна модель.

Однак, у цих працях поза увагою залишаються питання уникнення динамічних перешкод. Сучасні умови значного поширення засобів малої авіації та БПЛА у прикордонні роблять це питання надзвичайно актуальним.

Різні аспекти використання БПЛА в охороні кордону розглянуті в працях [7–9]. Дослідження [7] зосереджене на питаннях оцінки ефективності застосування БПЛА для вирішення основного завдання — спостереження з метою виявлення порушників кордону. При проведенні такої оцінки в [7] запропоновано комплексне урахування різних факторів, що впливають на можливість виявлення цілей залежно від поточного положення БПЛА в просторі. Однак при пошуку максимально ефективних траєкторій польоту БПЛА

при вирішенні завдань охорони кордону у [7] не приділена увага питанням уникнення можливих динамічних небезпек (розглядалось лише уникнення зіткнення з статичними об'єктами).

Вперше питання комплексного забезпечення безпеки польоту безпілотних літальних апаратів при вирішенні завдань з охорони кордону поставлене в [8]. Для його вирішення запропоновано комплексне урахування різних факторів, що впливають на можливість уникнення зіткнення з небезпечними об'єктами (зокрема і динамічними). До таких факторів у [8] віднесено: можливість виявлення небезпечних об'єктів та прогнозування їх руху, оцінки часу з моменту виявлення небезпечних об'єктів до початку здійснення керуючого впливу на сервообладнання (сельсини) БПЛА з метою здійснення маневрів для уникнення зіткнення.

Питання прогнозування руху небезпечних динамічних об'єктів, зіткнення з якими потрібно уникнути, розглянуті у дослідженнях [9; 10; 11]. Для вирішення цього завдання, залежно від наявної інформації про перешкоду, у [9] запропоновано або моделювання руху перешкоди або використання екстраполяції. В цьому дослідженні, також, проведена оцінка похибки екстраполяції в залежності від часового інтервалу протягом якого збирається інформація про рух динамічної перешкоди.

Виходячи з наведеного аналізу відомих досліджень у галузі безпеки польотів при застосуванні БПЛА, можливо зробити висновок, що значна кількість робіт зосереджена на описі динаміки польоту БПЛА з визначенням можливостей здійснення маневрів з метою уникнення зіткнень зі стаціонарними перешкодами. При цьому на такі аспекти, як об'єктивно наявні часові затримки до моменту здійснення керуючого впливу при виявленні динамічних перешкод та обмежені можливості апаратури виявлення цих перешкод, звернута увага у [8–9]. Однак для завершення цих досліджень необхідно формалізувати підхід до вирішення задачі забезпечення безпеки польоту БПЛА в умовах можливого виникнення динамічних перешкод.

Мета статті

Розробка методики визначення геометричних характеристик околу безпеки БПЛА при його польоті в інтересах виконання різномірних завдань.

Виклад основного матеріалу дослідження

Необхідність розвитку технічного забезпечення охорони державного кордону України з метою підвищення ефективності виявлення порушень прикордонного законодавства обумов-

лює впровадження останнім часом багатьох новітніх технічних засобів охорони кордону (СОЕС, МТК, тепловізорів тощо). Потреба збільшення ефективності спостереження в умовах перешкоджаючого впливу рельєфу місцевості робить необхідним підняття технічних засобів спостереження на значну висоту. В системі оптико-електронного спостереження для цього використані 42-метрові вежі. Однак застосування БПЛА дозволяє провести подальше кардинальне збільшення цієї висоти. Проте масштабне використання БПЛА в умовах значного поширення засобів малої авіації з урахуванням тенденції до зростання інтенсивності польотів в прикордонні потребує особливої уваги до питань забезпечення безпеки польотів. При цьому, одні засоби малої авіації можуть становити небезпеку для польотів інших. Розглянемо більш детально питання забезпечення безпеки польотів БПЛА з точки зору можливості уникнення небезпечного наближення до динамічних перешкод. При цьому, як це показано в [8], важливим є урахування наступних факторів:

- початкової відстані до небезпечного об'єкту, його швидкості та взаємного положення відносно БПЛА;

- часу, який витрачається до моменту початку здійснення керуючих впливів для ухилення від динамічної перешкоди БПЛА і який включає час необхідний на прогнозування руху небезпечного об'єкту та час необхідний на виявлення небезпеки та розрахунку зміни траєкторії руху БПЛА.

Відлік часу в дослідженнях доцільно розпочинати з моменту початкового виявлення потенційно небезпечного об'єкту.

Комплексне урахування викладених вище факторів при фіксованих обмежених можливостях маневрування БПЛА та обмеженій обчислювальній потужності його інформаційної системи дозволить визначити окіл безпеки навколо БПЛА, у межах якого, у разі виявлення тієї чи іншої перешкоди він зможе здійснити маневрування для уникнення зіткнення з нею [8].

Проведення такого дослідження дозволить провести оцінку існуючих зразків БПЛА з точки зору забезпечення ними умов безпечного польоту в умовах можливої появи динамічних перешкод. Ця оцінка може бути використана в подальшому як при формуванні парку БПЛА підрозділів правоохоронних органів та Збройних Сил України так і при визначенні технічних вимог при розробці та оснащенні БПЛА при їх застосуванні для виконання завдань відповідними підрозділами. Технічні вимоги, як передбачається, можуть стосуватись: сенсорів БПЛА (по їх ха-

рактеристикам виявлення та помилкам визначення координат); характеристик бортової обчислювальної системи; маневрених характеристик БПЛА.

Формалізований опис завдання визначення околу безпеки навколо БПЛА може бути проведений наступним чином. Момент виявлення потенційно небезпечної динамічної перешкоди приймається за початок відліку часу $t = 0$. Припускається, що в цей момент нам відоме положення БПЛА $(x_b(0), y_b(0), z_b(0))$ і потенційно небезпечного об'єкту відносно БПЛА, яке може бути переведене до системи координат у якій проводиться дослідження $(x_n(0), y_n(0), z_n(0))$ (рис. 1).

Окіл безпеки O_n (рис.1) визначимо, як множину точок, при виявленні до меж яких небезпеч-

них динамічних перешкод з урахуванням можливого маневрування БПЛА (з метою уникнення зіткнення) дозволить уникнути виникнення небезпечних ситуацій.

Тобто, при виявленні динамічних перешкод поза межами O_n можливо гарантувати безпеку польоту БПЛА (зокрема, за рахунок можливості маневрування з метою уникнення зіткнення).

Під небезпечною ситуацією будемо вважати небезпечне зближення БПЛА та динамічної перешкоди з урахуванням невизначеності її знаходження.

Дана невизначеність обумовлена об'єктивно наявними похибками вимірів координат бортовими сенсорами та екстраполяції траєкторій руху таких перешкод [9].

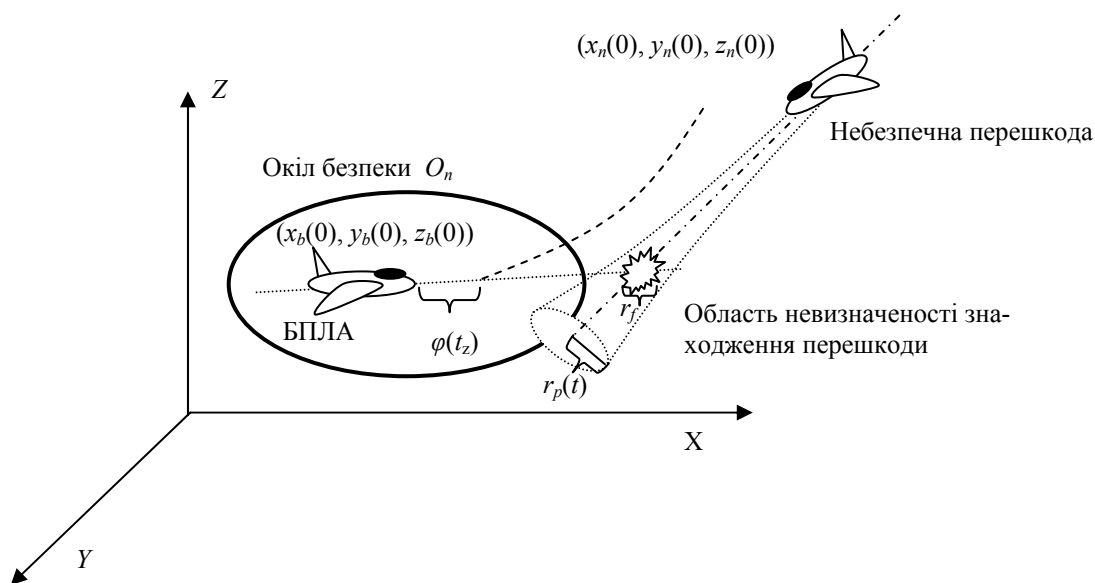


Рис. 1. Постановка завдання забезпечення безпеки польоту БПЛА

Для визначення околу O_n можливо розглянути різні варіанти початкового розміщення небезпечної перешкоди на різних відстанях від БПЛА. Виходячи з особливостей аеродинаміки польоту БПЛА і динамічної перешкоди, можливо припустити, що форма околу O_n буде симетричною відносно вертикальної площини XOZ (рис. 2), яка проходить через вектор швидкості БПЛА в початковий момент часу (при виявленні перешкоди). Динаміка відносного руху БПЛА та перешкоди при русі навздогін або назустріч буде різною.

З урахуванням цього, відносно площини A , яка паралельна YOZ (рис. 2), симетрія O_n має порушуватись (форма цієї області має бути витягнута в напрямі руху БПЛА). Аналогічно, можливо припустити, що внаслідок відмінності динаміки руху перешкоди при її зниженні та наборі висоти, симетрія O_n відносно площини B , яка паралельна XOY (рис. 2), також буде відсутня.

Тому для здійснення оцінки околу O_n доцільно знайти опорні точки (P_1-P_7) , що визначають його межі (рис. 2).

З метою визначення (P_1-P_7) пропонується розглянути різні варіанти початкового розташування динамічної перешкоди. Точки P_1 та P_2 знаходяться на прямій, що проходить через вектор швидкості БПЛА.

Пошук точки P_3 проводиться на горизонтальній прямій, яка проходить через точку початкового знаходження БПЛА і яка перпендикулярна площині XOZ .

Точки P_4 та P_5 визначаються на вертикальній прямій яка проходить через точку початкового знаходження БПЛА в площині A . З метою уточнення форми області O_n доцільне визначення додаткових проміжних точок P_6 та P_7 у вертикальній площині XOZ та горизонтальній площині B відповідно.

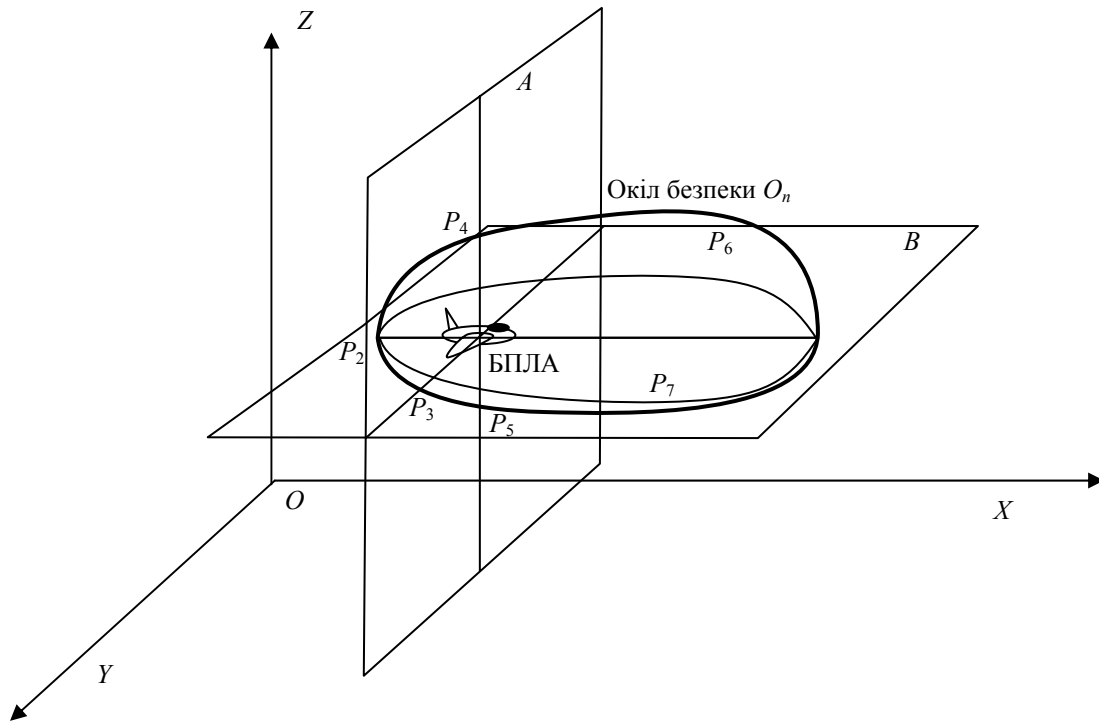


Рис. 2. Визначення опорних точок (\$P_1\$–\$P_7\$) околу безпеки

Підбір варіантів віддалення розташування точок (\$P_1\$–\$P_7\$) у відповідних напрямках доцільно розпочати з відстані дальності виявлення перешкоди. Для кожного досліджуваного варіанту положення перешкоди (рис. 2), було проведено моделювання подальшого польоту перешкоди і БПЛА.

Початкові умови динаміки руху перешкоди обиралися виходячи з найбільш небезпечного варіанту: траєкторії перешкоди і БПЛА наближаються на відстань меншу за фізичні розміри літальних апаратів (\$r_f\$), швидкість руху перешкоди максимальна.

Для різних початкових положень перешкоди відносно БПЛА вектор її початкової швидкості і тяги обиралися виходячи з умови подальшого зіткнення. З метою уникнення зіткнення через час \$t_z\$ (за який БПЛА рухається без зміни траєкторії наближаючись до зіткнення з перешкодою) проводилося моделювання подальшого польоту БПЛА з урахуванням максимально можливого керуючого впливу. При цьому для забезпечення уникнення небезпеки зіткнення здійснювався контроль зближення БПЛА і динамічної перешкоди в часі. У випадку, якщо у будь який подальший момент часу таке зближення буде меншим за \$r_f + r_p(t)\$, відповідна точка початкового положення перешкоди вважатиметься належною до \$O_n\$. Моделювання польоту БПЛА і перешкоди поведилося з використанням відомої математичної моделі [5–6], яка описує динаміку руху літального апарату (1).

$$\begin{cases} \dot{v} = (n_x - \sin \vartheta)g \\ \dot{\vartheta} = \frac{(n_y \cos \gamma - \cos \vartheta)g}{v} \\ \dot{\psi} = -\frac{n_y g \sin \gamma}{v \cos \vartheta} \\ \dot{x} = v \cos \vartheta \cos \psi \\ \dot{y} = -v \cos \vartheta \sin \psi \\ \dot{z} = v \sin \vartheta \end{cases}, \quad (1)$$

де \$v\$ — швидкість польоту; \$\vartheta\$ — кут нахилу траєкторії; \$\psi\$ — кут курсу; \$n_x\$ — повздовжнє перевантаження; \$n_y\$ — поперечне перевантаження; \$\gamma\$ — кут крену; \$(x, y, z)\$ — є координатами літального апарату в прямокутній топоцентричній системі координат.

Основними управляючими впливами, з використанням яких можливе маневрування польотом БПЛА є повздовжнє і поперечне перевантаження та кут крену.

Для обчислення перевантажень були використані такі вирази [6]:

$$n_x = \frac{P - Q}{G}, \quad (2)$$

$$n_y = \frac{Y}{G}, \quad (3)$$

де \$P\$ — сила тяги; \$Q\$ — сила лобового опору; \$G\$ — сила тяжіння; \$Y\$ — підйомна сила.

Основні сили, які діють на літальний апарат і які використовуються у (2) – (3) обчислювалися таким чином:

$$G = mg, \quad (4)$$

$$Y = c_y S \frac{\rho v^2}{2}, \quad (5)$$

$$Q = c_x S_l \frac{\rho v^2}{2}, \quad (6)$$

де m — маса літального апарату; g — прискорення вільного падіння; c_y — коефіцієнт підйомної сили; S — площа крил; ρ — густина повітря; c_x — коефіцієнт лобового опору; S_l — площа лобового профілю літального апарату.

Коефіцієнт підйомної сили c_y залежить від кута нахилу траєкторії і наближено обчислювався з використанням інтерполяційних формул [12].

З метою розв'язання системи (1) були застосовані чисельні методи, які на досліджуваному проміжку часу можуть забезпечити потрібну точність, зокрема, Рунге—Кутта з адаптивним кроком (який реалізований в MathCad).

В описаній вище методиці визначення околу безпеки O_n важливим є, також, вибір траєкторії польоту БПЛА. Траєкторія будь-якого літального апарату (включно БПЛА), який здійснює моніторинг наземного простору, як правило має три основні складові: зліт та набір висоти, стаціонарний політ на оптимальній для спостереження висоті, зниження і посадка [7]. Перша і остання ділянки є нетривалими по часу і, звичайно, здійснюються під додатковим контролем, який суттєво знижує ймовірність небезпечного зіткнення. Тому вбачається за доцільне розглянути безпеку БПЛА у режимі встановленого горизонтального польоту на оптимальній для здійснення спостереження заданих об'єктів висоті. В цьому режимі центр мас БПЛА рухається рівномірно і прямолінійно.

Відповідно до цього, геометрична сума сил, які діють на БПЛА має дорівнювати нулю. Це можливо використати для отримання системи рівнянь з метою визначення параметрів, за яких досягається даний режим польоту

$$\begin{cases} mg = c_y S \frac{\rho v^2}{2}; \\ P = c_x S_l \frac{\rho v^2}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

З першого рівняння (7) отримуємо умову для швидкості руху БПЛА у режимі встановленого горизонтального польоту

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{c_y S \rho}}. \quad (8)$$

Із другого рівняння отримуємо силу тяги для забезпечення встановленого горизонтального польоту БПЛА

$$P = \frac{c_x S_l g m}{c_y S}. \quad (9)$$

Для БПЛА, що використовуються у прикордонному відомстві, з урахуванням сили тяги і швидкості руху отриманих з виразів (8)–(9), траєкторія отримана в результаті моделювання у режимі встановленого горизонтального польоту.

Політ БПЛА відбувається на сталій висоті, яка необхідна для ефективного ведення спостереження за прикордонною територією. При цьому швидкість руху БПЛА не змінюється у часі.

Розглянемо перший варіант (P_1) початкового знаходження динамічної перешкоди. При цьому, як було визначено вище, найбільшу небезпеку становить рух перешкоди зустрічним курсом.

Розглянемо випадок коли рух двох літальних апаратів відбувається на одній висоті назустріч один одному. Якщо БПЛА не здійснюватиме маневрування з метою ухилення від динамічної перешкоди, відбудеться зіткнення. Графік зміни відстані між досліджуваними об'єктами L (при початковій відстані $L_0 = 150$ м.) в часі представлений на рис. 3.

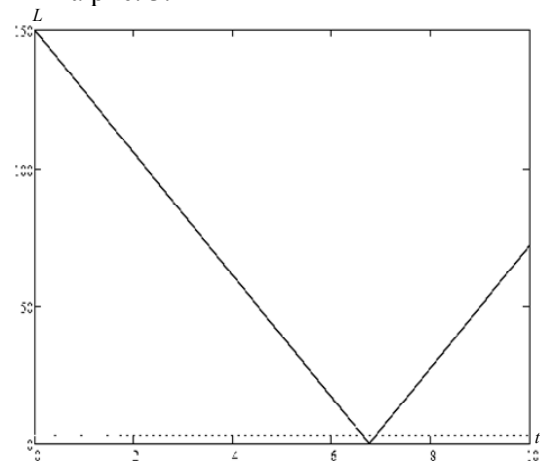


Рис. 3 Відстань між БПЛА та динамічною перешкодою

На рис. 3 суцільною лінією відображено взаємну зміну відстані між БПЛА та перешкодою. Результати моделювання свідчать, що ця відстань лінійно скорочується практично до 0 (близько 7 с з моменту виявлення перешкоди), а потім зростає. Лінійність цієї залежності в часі відображає сталість швидкостей літальних апаратів. Для зручності на рис. 3 коротким пунктиром показаний пороговий рівень небезпечного наближення обумовлений фізичними розмірами літальних апаратів r_f та довгим пунктиром — рівень $r_f + r_p(t)$, який використовується в критерії визначення безпеки. Очевидно, що у випадку представленому на рис. 3 порушується як перший, так і другий критерій безпеки польоту (відстань між літальними об'єктами менша як за перший, так і за другий рівень).

Розглянемо маневрування БПЛА з метою ухилення від зіткнення при різних початкових відстанях, з метою визначення межі P_1 області безпеки O_n . При цьому надзвичайно важливий час затримки до початку маневрування, обумовлений необхідністю забезпечення необхідної точності екстраполяції руху перешкоди [9] та обробки інформації.

Як показано у праці [9], такий час для типу БПЛА, що розглядається може становити 1,6 с. Відповідні графіки для різних початкових відстаней L_0 між БПЛА та перешкодою, при яких виконуються перший та другий критерії небезпеки, представлені на рис. 4.

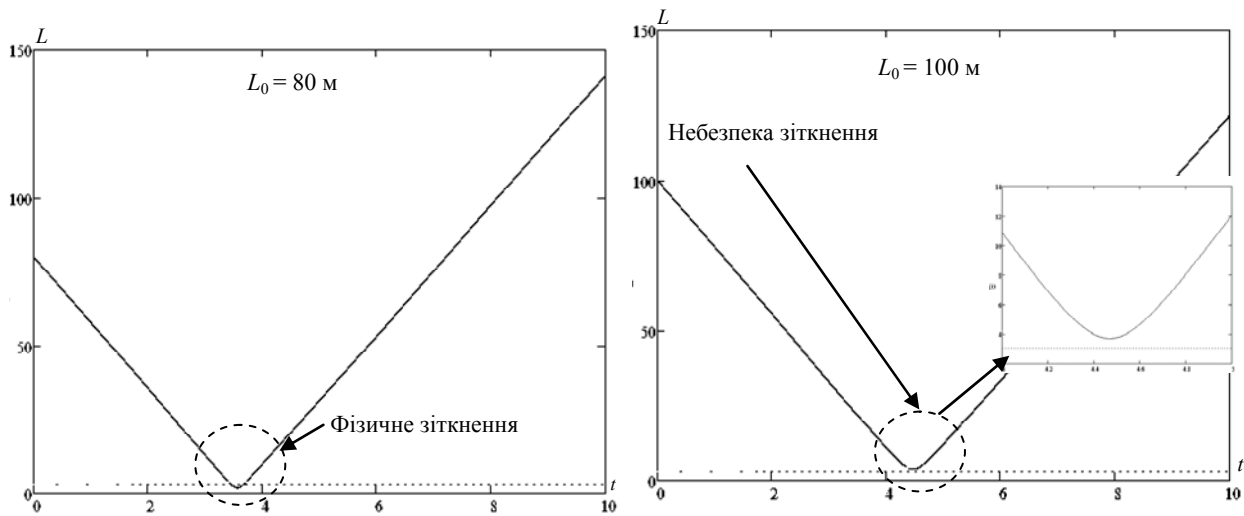


Рис. 4. Небезпека польоту при близькому виявленні динамічної перешкоди

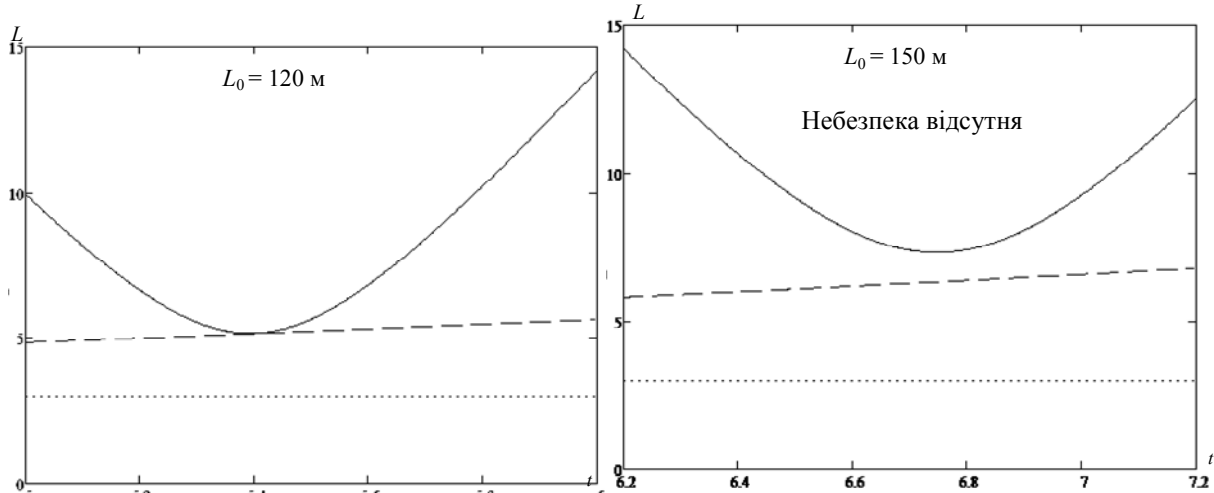


Рис. 5. Визначення межі P_1 області безпеки O_n

Однак, якщо динамічна перешкода буде виявлена сенсорами БПЛА на більшій відстані, небезпеки можливо уникнути. Про це свідчать результати моделювання, відображені на рис. 6, які, для зручності сприйняття, наведені в околі максимального зближення об'єктів.

З аналізу проведених розрахунків та результатів моделювання (рис. 5) витікає, що точка P_1

Однак, якщо динамічна перешкода буде виявлена сенсорами БПЛА на більшій відстані, небезпеки можливо уникнути.

Про це свідчать результати моделювання, відображені на рис. 6, які, для зручності сприйняття, наведені в околі максимального зближення об'єктів. З аналізу проведених розрахунків та результатів моделювання (рис. 5) витікає, що точка P_1 області безпеки O_n знаходиться на відстані 120 м. Якщо виявлення динамічної перешкоди відбувається на більшій відстані, небезпеки можливо уникнути.

При виявленні такої перешкоди на меншій відстані наявна небезпека зіткнення.

області безпеки O_n знаходиться на відстані 120 м. Якщо виявлення динамічної перешкоди відбувається на більшій відстані, небезпеки можливо уникнути. При виявленні такої перешкоди на меншій відстані наявна небезпека зіткнення.

Використавши аналогічний підхід, знайдемо положення точки P_2 . Для цього розташуємо початкове положення динамічної перешкоди за

БПЛА, спрямувавши її рух в тому ж напрямі. Оскільки абсолютна швидкість руху перешкоди більша ніж у БПЛА, без проведення маневрування відстань між літальними апаратами з часом скорочується.

Якщо початкова відстань $L_0 = 10$ м, що менше за граничну відстань, навіть з урахуванням маневрування БПЛА, зближення літальних апаратів є небезпечним (рис. 6).

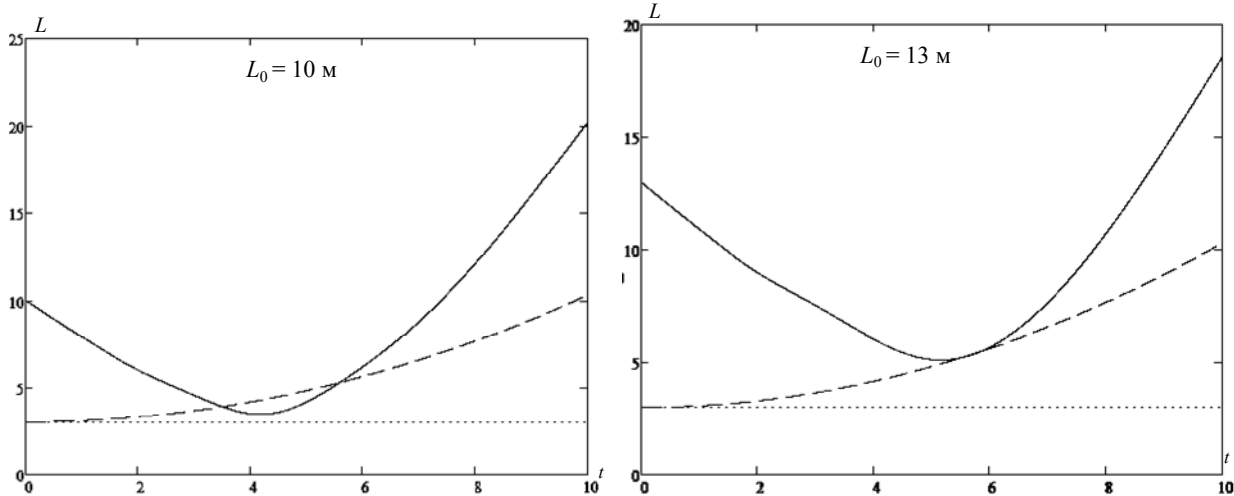


Рис. 6. Визначення межі P_2 області безпеки O_n

Однак, коли ця відстань зростає більше за пороговий рівень 13 м, зіткнення можливо уникнути (рис. 6). Таким чином, гіпотеза про несиметричність околу безпеки O_n відносно площини A (рис.2), підтвердилась. При цьому довжина околу безпеки в напрямі руху БПЛА майже в 10 разів більша за аналогічну довжину в протилежному напрямі.

Слід відмітити, що на розміри області безпеки певний вплив має час затримки t_z , обумовлений необхідністю збору інформації для екстраполяції руху перешкоди та час, який необхідний для обробки інформації. При цьому, збільшення часу збору інформації, з одного боку, за рахунок більш пізнього початку маневру ухилення, має приводити до розширення області безпеки O_n . Однак, з іншого боку, таке збільшення часу має приводити до зменшення наростання похибки екстраполяції, що має приводити до незначного звуження області безпеки O_n . З метою перевірки співвідношення ступенів протилежного впливу зміни цього параметру, проведемо моделювання для t_z збільшеного на 0,2 с. Знаходження інших точок, які визначають межі області безпеки O_n , проводяться за аналогічною методикою. Вона передбачає: моделювання польоту БПЛА (без маневрування) та динамічної перешкоди для різних варіантів початкових положень перешкоди (P_3-P_7). При цьому початкові умови руху перешкоди (вектор швидкості) обираються, виходячи з виконання першого критерію зіткнення (відстань між об'єктами менша за фізичні розміри r_f).

Моделювання польоту БПЛА з маневром ухилення від зіткнення та динамічної перешкоди для

різних початкових відстаней L_0 з метою знаходження гранично небезпечної відстані (за другим критерієм не перевищення відстані між об'єктами порогового рівня $r_f + r_p(t)$), яка визначає відповідну точку на межі області безпеки O_n .

Множини L та VP у межах яких з певним кроком здійснюється перебір значень початкової відстані між літальними апаратами і компонент вектору швидкості динамічної перешкоди вибираються дослідником. Напрямок перебору по множині L (зменшення або збільшення L_0) обирається виходячи з виконання або невиконання умови зближення 2 (другий критерій небезпеки) та результатів попередніх досліджень.

Як показали результати моделювання, таке зростання часу затримки привело до незначного зменшення відстані до межі P_2 (на 20 см). Проте, при такому зростанні часу затримки (за рахунок збільшення часу збору інформації для екстраполяції), відстань до межі P_1 не змінилась. Це свідчить про взаємну компенсацію описаних вище впливів для частини області безпеки O_n у напрямі руху БПЛА і незначній перевазі позитивного впливу збільшення точності екстраполяції в протилежному напрямку.

Висновки

Запропонована у роботі методика дозволяє знаходити межі області безпеки для уникнення зіткнення БПЛА з динамічними перешкодами. Інформація про розміри та форму цієї області може бути використана для визначення критеріїв обґрунтування тактико-технічних вимог та характеристик БПЛА при формуванні парку БПЛА підрозділів правоохоронних органів та Збройних

Сил України так і при визначенні технічних вимог при розробці та оснащенні БПЛА при їх застосуванні для виконання завдань відповідними підрозділами. Отже, ця інформація може використовуватись при розробці нових зразків БПЛА для обґрунтування вимог до їх маневрених характеристик, можливостей бортових сенсорів призначених для виявлення перешкод та вимог до характеристик бортової інформаційної системи з урахуванням особливостей програмно-алгоритмічного забезпечення.

З результатів дослідження випливає, що форма і розміри області безпеки залежать від багатьох факторів, таких як: час затримки (обумовлений необхідністю збору інформації для екстраполяції руху перешкоди, виявлення небезпеки зіткнення і прийняття рішення на маневрування), маневрені можливості БПЛА, та характеристики динамічної перешкоди та параметрів її руху.

Збільшення часу збору інформації для подальшої екстраполяції несуттєво вплинуло на розміри області безпеки. При цьому такий вплив стосувався, переважно, незначного зменшення задньої частини області безпеки. Однак, збільшення загального часу затримки за рахунок частки необхідної для обробки інформації (зниження швидкодії бортової інформаційної системи БПЛА), безумовно приводить до розширення розмірів області безпеки.

Результати проведених досліджень підтвердили гіпотезу про несиметричність форми області безпеки, зокрема, її значну витягненість (майже в 10 разів) у напрямі руху БПЛА. Це обумовлює потребу у більш дальньому виявленні динамічної перешкоди у цьому напрямі. Для розглянутого у дослідженні випадку (характеристик БПЛА і динамічної перешкоди), ця дальність склала 120 м. Разом з тим існує потреба і у виявленні динамічних перешкод у протилежному напрямі. Проте, для успішного здійснення маневру ухилення, у розглянутому випадку достатньо було виявити перешкоду на відстані понад 13 м. Все це визначає технічні характеристики БПЛА.

Слід відмітити, що в рамках проведеного дослідження приймалась незмінність характеру динаміки руху перешкоди. У даній роботі розглядалось маневрування з метою уникнення зіткнення лише БПЛА. Однак на практиці можливе і управління польотом БПЛА і маневрування динамічної перешкоди. При цьому таке управління може бути організоване як з метою уникнення зіткнення, так і з протилежною метою (для умисного ураження БПЛА противника або іншого об'єкта). У першому випадку можливо припустити зменшення розмірів області безпеки. У другому випадку ця область імовірно розшириться. З метою уникнення зіткнення, можливо також розглянути координату маневрування БПЛА і динамічної перешкоди. Якщо БПЛА здійснюва-

тиме маневр ухилення вліво з набором висоти, динамічну перешкоду доцільно спрямувати в іншому напрямі. Такий аналіз є одним із напрямів подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Danyk Y., Maliarchuk T., Briggs Ch.** Hybrid War: High-tech, Information and Cyber Conflicts, Connections. *The Quarterly Journal*. Vol. 16, No. 2 (Spring 2017), pp. 5—24. URL: <http://www.jstor.org/stable/26326478>. (дата звернення 27.04.2018).
2. **Даник Ю. Г., Катеринчук І. С., Балицький І. І.** Методика забезпечення безпеки застосування БПЛА при виконанні спеціальних задач в складних умовах. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2017. №3(30). С. 80—89.
3. **Ардентов А. А., Бесчастный И. Ю., Маштаков А. П., Попов А. Ю. и др.** Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА. *Программные системы: теория и приложения*. 2012. Т. 3. №3(12), С. 23—38.
4. **Тань Лиго, Фомичев А. В.** Планирование пространственного маршрута полета беспилотного летательного аппарата с использованием методов частично целочисленного линейного программирования. *Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2016. № 2. С. 53—66. doi: 10.18698/0236-3933-2016-2-53-66.
5. **Крищенко А. П., Канатников А. Н., Ткачев С. Б.** Планирование пространственного разворота беспилотного летательного аппарата. *Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Энергетическое и транспортное машиностроение. Специальный выпуск*. 2011. С. 151—163.
6. **Тявкин И. В., Тютюнник В. М.** Аналитические и процедурные модели для информационной системы симуляции полета. *Фундаментальные исследования*. 2012. № 6-2. С. 476—481.
7. **Katerynychuk I., Shynkaruk O., Balytskyi I.** Definition of approaches to the assessment of tactical unmanned aerial vehicles effective use in the state border guard body. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: 14th IEEE International Conference TCSET-2018 (Lviv-Slavske, Ukraine, February 20—24, 2018)*. — P. 1255—1259.
8. **Балицький І. І.** Забезпечення безпеки польоту безпілотних літальних апаратів при вирішенні завдань з охорони кордону. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: Військові та технічні науки*. 2018. № 2(76). С. 55—65.
9. **Даник Ю. Г., Балицький І. І.** Прогнозування траєкторій руху динамічних перешкод в задачах забезпечення безпеки польоту безпілотних літальних апаратів. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: Військові та технічні науки*. 2018. № 2(77). С. 33—45.
10. **Kondrashov Ya. V., Arutyunyan A. K., Kravchyshyn I. O.** Principles of termination control of unmanned aerial vehicles flight path. *Наукоємні тех-*

нології. 2009. №2 (2). С. 45-48. doi: 10.18372/2310-5461.2.5274.

11. **Kondrashov Ya. V., Arutyunyan A. K., Kravchyshyn I. O.** Mathematical modeling of the termination flight control algorithm for unmanned aerial

vehicle. *Наукоємні технології*. 2010. №1 (5). С. 44-48. doi: 10.18372/2310-5461.5.5028.

12. **Хомицкий Д. В.** Моделирование элементов динамики самолёта в условиях неустойчивости на большой высоте: практикум. Нижний Новгород. 2008. С. 37.

Даник Ю. Г., Балицький І. І.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОКОЛУ БЕЗПЕКИ БПЛА

У роботі розглянуто варіант вирішення задачі забезпечення безпеки польоту безпілотного літального апарату (БПЛА) в умовах можливого виникнення динамічних перешкод.

Для розв'язання даної задачі розроблено методику визначення околу безпеки БПЛА при його польоті з метою виконання різномірних завдань. В межах даної методики запропоновано: варіант прогнозування руху динамічної перешкоди, моделювання зміни траєкторії польоту БПЛА, урахування часових проміжків які в сукупності визначають час після виявлення перешкоди до початку маневрування, критерій оцінки небезпеки зіткнення який, зокрема, враховує похибки прогнозування. З використанням розробленої методики на основі встановленого околу безпеки можливо: сформулювати обґрунтовані вимоги до маневрових характеристик БПЛА при формуванні парку БПЛА підрозділів структур сектору національної безпеки і оборони держави (правоохоронних органів, Збройних Сил тощо) визначити вимоги до бортової інформаційної системи та сенсорів які здійснюють виявлення динамічних перешкод.

Ключові слова: БПЛА; безпека польоту; динаміка польоту; зіткнення з динамічною перешкодою; бортова інформаційна система.

Danyk Y. G., Balytskyi I. I.

METHOD OF THE UAV SAFETY VICINITY DETERMINATION

The widespread use of these means, taking into account the prospects for increasing the intensity of flights of small aircraft, aggravates the problem of the safety of the flight within the border area at relatively low altitudes. In this case, it is necessary to study the possibilities of UAV deviation from collision with dynamic obstacles taking into account many factors. A large range of modern research studies is devoted to the use of UAV flight safety, but most of them focus on diverting from static hazards due to the complexity of the terrain and the presence of certain static objects (buildings, various towers, and other possible obstacles). The paper considers the option of solving the problem to ensure the safety of a flight of an unmanned aerial vehicle (UAV) in conditions of possible occurrence of dynamic obstacles. To solve this problem, a method of the UAV safety vicinity determination during its flight in order to perform heterogeneous tasks has been developed. The proposed methodology allows finding the limits of the danger area of the UAV collision with dynamic obstacles. Within the limits of this method, the following has been proposed: alternative approach to forecast movement of a dynamic obstacle, simulation of changes in UAV flight trajectory, taking into account time intervals that collectively determine the time upon obstacles detection prior to the beginning of maneuvering, a criterion for assessing the collision hazard, which, in particular, takes into account forecasting errors.

Using the developed method on the basis of the established safety vicinity it is possible: to formulate the justified requirements for the UAV maneuvering characteristics in the process of the formation of the UAV fleet for the units of the structures of the sector of national security and defense of the state (law enforcement agencies, the Armed Forces, etc.); to determine the requirements for the on-board information system and sensors identifying dynamic obstacles. Also, the results of the study will allow an assessment of existing UAV samples from the point of view of providing safety by them under conditions of possible emergence of dynamic obstacles.

Keywords: UAV; flight safety; flight dynamics; collision with dynamic obstacle; on-board information system.

Даник Ю. Г., Балицкий И. И.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОКРЕСТНОСТИ БЕЗОПАСНОСТИ БПЛА

В работе рассмотрен вариант решения задачи обеспечения безопасности полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в условиях возможного возникновения динамических препятствий.

Для решения данной задачи разработана методика определения окрестности безопасности БПЛА при его полете с целью выполнения разнородных задач. В рамках данной методики предложено: вариант прогнозирования движения динамической препятствия, моделирование изменения траектории полета БПЛА, учета временных промежутков, которые в совокупности определяют время после обнаружения препятствия до начала маневрирования, критерий оценки опасности столкновения который, в частности, учитывает погрешности прогнозирования. С использованием разработанной методики на основе установленного окрестности безопасности возможно: сформулировать обоснованные требования к маневровым характеристикам БПЛА при формировании парка БПЛА подразделений структур сектора национальной безопасности и обороны государства (правоохранительных органов, Вооруженных Сил и т.д.) определить требования к бортовой информационной системы и сенсоров, осуществляющих выявление динамических помех.

Ключевые слова: БПЛА; безопасность полета; динамика полета; столкновения с динамическим препятствием; бортовая информационная система.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2018 р.

Прийнято до друку 19.11.2018 р.