

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО СТИЙКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА В УМОВАХ ТУРБУЛЕНТНОСТІ АТМОСФЕРИ

В статті запропоновано підхід щодо оцінки впливу турбулентності повітряної середовища на функціональну стійкість дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного призначення в надзвичайних ситуаціях. Визначені особливості моделі дистанційно пілотованих літальних апаратів з урахуванням турбулентності атмосфери.

В статье предложен подход к оценке влияния турбулентности воздушной среды на функциональную устойчивость дистанционно пилотируемых летательных аппаратов экологического назначения в чрезвычайных ситуациях. Определены особенности модели дистанционно пилотируемых летательных аппаратов с учетом турбулентности атмосферы.

The article suggests an approach to assess the impact of the turbulence of the air environment on the functional stability of remotely piloted aircraft for environmental purposes in emergency situations. The features of the model remotely piloted aircraft, based on atmospheric turbulence.

Ключові слова: функціонально-стійка система, моніторинг, турбулентність атмосфери, дистанційно пілотовані літальні апарати.

Ключевые слова: функционально-устойчивая система, мониторинг, турбулентность атмосферы, дистанционно пилотируемые летательные аппараты.

Keywords: functional and stable system, monitoring, atmospheric turbulence, remotely piloted aircraft.

Вступ. Побіжний огляд останніх міжнародних авіаційних салонів переконливо свідчить, що безпілотні літальні апарати (БПЛА) з кожним роком займають все більше місце в екологічному моніторингу об'єктів природокористування та природного середовища.

Активний розвиток безпілотної авіації обумовлений рядом їх важливих переваг. Перш за все, це відсутність екіпажа, відносно невелика вартість БПЛА, малі витрати на їх експлуатацію, велика тривалість і дальність польоту через відсутність чинника втоми екіпажа і інші переваги в порівнянні з пілотованою авіацією.

За станом на початок цього століття більше 50 фірм в багатьох країнах розробляли і випускали БПЛА більше 150 типів. Підсумки широкомасштабного використання безпілотних літальних апаратів дозволяють виявити тенденції подальшого застосування БПЛА в різних умовах. Однією з таких тенденцій є групове застосування дистанційно

пілотованих літальних апаратів.

При цьому виникає ряд наукових завдань синтезу структури (конфігурації) групового комплексу і алгоритмів його функціонування.

У складних нелінійних моделях, що описують стан польоту груп дистанційно пілотованих літальних апаратів, які є базовими при синтезі ефективного ситуативного управління цими об'єктами, доцільно врахувати такий ф, як динамічні процеси в атмосфері (турбулентність повітряного середовища). Як показує аналіз досвіду застосування безпілотних маневрених літальних апаратів, турбулентність повітряного середовища викликає зміну їх аеродинамічних сил і моментів. Це суттєво впливає на функціональну стійкість управління безпілотними літаками, і особливо у випадках одночасного використання груп декількох дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА).

Як відомо, динамічні процеси, що відбуваються в атмосфері, носять синергетичний характер і залежать від величезної кількості факторів. Основні з цих факторів – це географічне розташування місцевості польоту, тип підстилаючої поверхні, висота польоту, пора року і навіть час доби. Особливо відзначимо, що повітряне середовище - надзвичайно складний об'єкт для моделювання, хоча описані явища мають певні відповідні математичні моделі. З цих моделей найбільший інтерес для цілей синтезу управління і моделювання просторового руху представляють моделі турбулентності атмосфери, особливо повітряних потоків біля земної поверхні. Цей стан атмосфери, може описуватися імовірнісними характеристиками і носить синергетичний характер.

Реакція групи дистанційно пілотованих літальних апаратів на дії ситуативних факторів турбулентності атмосфери традиційно вивчається і досліджується за допомогою методів статистичної динаміки.

Врахування впливу турбулентності повітряного середовища необхідно здійснювати з використанням моделей дистанційно пілотованих літальних апаратів, що є рівняннями, що описують динаміку руху кожного апарату, роботу силових установок і сервоприводов. Це дозволить синтезувати алгоритми синергетичного ситуативного управління польотом груп дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного призначення.

Оцінка впливу турбулентності повітряної середовища на функціональну стійкість ДПЛА екологічного призначення в надзвичайних ситуаціях.

Для оцінки впливу турбулентності повітряного середовища на динаміку руху груп дистанційно пілотованих літальних апаратів застосуємо підхід алгебри. Отримані результати використовуватимемо для встановлення загальних закономірностей і визначення необхідних вимог до ситуативних систем управління дистанційно пілотованими літальними апаратами екологічного призначення.

Для проведення досліджень виходитимемо з припущення, що повітряне середовище однорідне та ізотропне. У зв'язку з цим для всіх точок простору, в якому передбачається маневрування груп дистанційно пілотованих

літальних апаратів, математичне очікування, дисперсія і щільність розподілу випадкової швидкості вітру будуть однаковими.

Відомо, що складова швидкості однорідної ізотропного середовища уздовж траєкторії руху кожного дистанційно пілотованого літального апарату може бути представлена спектральною щільністю, яка визначається з наступним чином

$$S_1(\omega) = \frac{2\delta_u^2 LV^{-1}}{1 + \omega^2 LV^{-2}}, \quad (1)$$

де δ_u^2 - дисперсія швидкості подовжньої складової вітру;

V - швидкість польоту дистанційно пілотованого літального апарату;

ω - частоти складових випадкового сигналу, діапазон зміни яких знаходиться в межах.

Вертикальна та бокова складові турбулентної атмосфери, нормальні до траєкторії польоту безпілотного літака і лежачі, відповідно, в площині симетрії літака і в площині його крила, визначаються спектральною щільністю

$$S_2(\omega) = \delta_u^2 LV^{-1} \left(\frac{1 + 3\omega^2 L^2 V^{-2}}{(1 + \omega^2 L^2 V^{-2})^2} \right). \quad (2)$$

Для визначення дисперсії вихідного сигналу такої складної динамічної системи, як група дистанційно пілотованих літальних апаратів скористаємося наступним виразом

$$D_{ij} = S_0 I_{ij} \quad (3)$$

Для використання (3) в розглядаемому випадку системного синтезу ситуативних систем синергетичного управління дистанційно пілотованих літальних апаратів необхідно визначити диференціальні рівняння, що описують формуючі фільтри перетворення сигналу «білий шум» з спектральною щільністю у вигляді (1) і (2). Далі складаємо модель розширеної системи, що містить рівняння сумісного польоту двох безпілотних літаків. В ній враховуємо рівняння впливу формуючого фільтру для даного вітрового і передбачуваного управління. Для спрощення проведення досліджень приймаємо допущення, що процеси управління безпілотними літаками - стійкі. Відповідні спектральні щільності можуть бути визначені з співвідношення

$$S_i(\omega) = (W_i(j\omega))^2 S_x(\omega), \quad (4)$$

де $S_x(\omega)$ - спектральна щільність вхідного сигналу формуючого фільтру.

(4) знаходимо для визначення амплитудно-фазових характеристик

$$\begin{aligned} |W_1(j\omega)|^2 &= S_1(\omega), \\ |W_2(j\omega)|^2 &= S_2(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

Далі з (5), визначимо диференціальне рівняння, що описують стан

першого фільтру

$$\dot{u}_x = -VL^{-1}u_x + \delta_u \sqrt{2VL^{-1}} \xi, \quad (6)$$

і другого фільтру

$$\begin{vmatrix} \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -V^2L^{-2} \\ 1 & -2VL^{-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta_u (VL^{-1})^{\frac{3}{2}} \\ \delta_u (3VL^{-1})^{\frac{1}{2}} \end{vmatrix} |\xi|, \quad (7)$$

Особливості моделі дистанційно пілотованих літальних апаратів з урахуванням турбулентності атмосфери.

Модель стану при динамічному русі ДПЛА доцільно представитиспочатку в найзагальнішому вигляді

$$\dot{X} = AX + Gu, \quad (8)$$

де X - вектор стану безпілотних літаків, який включає параметри їх автономного польоту і параметри координат відносного положення в групах;

A – матриця коефіцієнтів, яка характеризує дистанційно пілотований літальних апаратів апарат як об'єкт управління;

G – матриця коефіцієнтів ефективності сигналів, що управляють;

u – вектор сигналів безпілотних літаків, що управляють.

В рівнянні (8) матриці A і G можуть бути представлені у вигляді

$$A = \begin{vmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{vmatrix}, \quad G = \begin{vmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (9)$$

Тоді рівняння (8) доцільно представити двома системами рівнянь. Перша система рівнянь має вигляд

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= A_{11}X_1 + G_1u_1, \\ \dot{X}_2 &= A_{22}X_2 + G_2u_2, \\ \dot{Y}_{om} &= A_{31}X_1 + A_{32}X_2 + A_{33}Y_{om}. \end{aligned} \quad (10)$$

У системі рівнянь (10) позначено X_1 та X_2 - вектори стану автономного руху відповідно першого і другого ДПЛА літаків; Y_{om} - вектор координат відносного положення ДПЛА; u_1, u_2 - вектори варіацій координат дій, що управляють; G_1, G_2 - матриці коефіцієнтів внутрішніх зв'язків в моделі ДПЛА; $A_{11}, A_{22}, A_{31}, A_{32}, A_{33}$ - матриці коефіцієнтів ефективності управління ДПЛА, що входять у матриці вигляду (9) для математичної моделі (1).

Друга система на додаток до моделі (10) представлена рівняннями вигляду.

$$\begin{aligned} X_{C1} &= A_{11}X_{C1} + G_1u_1 \\ X_{C2} &= A_{22}X_{C2} + G_2u_2 \end{aligned} \quad (11)$$

Вона містить ізольовані рівняння безпілотних літаків.

Для складання рівняння польоту цих апаратів у формі (10) і (11)

використовуємо вирази алгебри залежності елементів матриць, що входять в ці рівняння, від параметрів польоту. Розглянемо для модельного прикладу найбільш типові польотні ситуації застосування ДПЛА в групах, а саме, режим подовжнього руху і сумісного розвороту в горизонтальній площині. У подовжньому русі вектори стану безпілотних літаків, які відповідають рівнянням їх автономного руху, представимо у вигляді

$$X_1 = [\bar{n}_1 V_1 \theta_1 \omega_{z1} v_1]^T, \quad (12)$$

$$X_2 = [\bar{n}_2 V_2 \theta_2 \omega_{z2} v_2]^T.$$

Вектори управління ДПЛА літаками представимо у вигляді

$$u_1 = [\delta_{1\text{об}} \phi_1], \quad u_2 = [\delta_{2\text{об}} \phi_2], \quad (13)$$

У виразах (12) і (13) використовані загальноновизнані означення з теорії аеродинаміки і динаміки керованого польоту.

Ідентичні по структурі матриці, що входять в модель (10), мають наступний вигляд

$$A_{11} = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad G = \begin{vmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \\ 0 & g_{32} \\ 0 & g_{42} \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Елементи цих матриць визначаються шляхом чисельного диференціювання нелінійних рівнянь польоту груп безпілотних літаків по елементах вектора стану при параметрах їх польоту, відповідних значенням балансувань або поточних.

Рівняння, що описує сумісний рух ДПЛА літаків (10) з урахуванням управлінь, що синтезуються, їх станом, також збудуючих сигналів представлено у вигляді

$$\begin{vmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{Y}_{om} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ -G_2 K_{21} & D_{22} & -G_2 K_{23} \\ A_{31} & A_{32} & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_1 \\ X_2 \\ Y_{om} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \chi_{v1} & \chi_{v1} \\ \chi_{v2} & \chi_{v2} \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_x \\ u_y \\ V \end{vmatrix}, \quad (15)$$

У короткій формі модель (15) представимо у вигляді

$$\dot{Z} = DZ + \chi_v u_x + \chi_v \frac{1}{V} u_y, \quad (16)$$

де Z - вектор стану замкнутої системи управління; u_x і u_y - вектори коефіцієнтів ефективності дії для складових швидкості вітру, D матриця коефіцієнтів замкнутої системи управління ДПЛА.

Для в ситуативній системі управління ДПЛА впливу на політ випадкового сигналу складемо з виразів (6) і (16) першу розширену модель вигляду

$$\begin{vmatrix} \dot{Z} \\ u_x \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \chi_v \\ -VL^{-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Z \\ u_x \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ g_\Phi \end{vmatrix} \|\xi\|, \quad (17)$$

Результати дії випадкового сигналу оцінюються з урахуванням (7) і (16) на основі другої розширеної моделі

$$\begin{vmatrix} \dot{Z} \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D & 0 & \chi_v V^{-1} \\ 0 & 0 & -V^2 L^2 \\ 0 & 1 & -2VL^{-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Z \\ Y_1 \\ Y_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ g_\Phi \\ g_\Phi \end{vmatrix} \|\xi\|, \quad (18)$$

Представимо рівняння (17)-(18) в наступному вигляді

$$\dot{Z}_n = D_n Z_n + g_n \xi. \quad (19)$$

Як показують дослідження, для обчислення величини, що входить у вирази дисперсії (3), можливо використовувати два наступних підходи. Перший з них полягає в тому, що в рівнянні (19) дія сигналу ξ замінюється ненульовою початковою умовою Z_0 і визначаються оцінки Z уздовж траєкторії вільного руху системи (19). Після цього матричне рівняння вигляду

$$P_i D_n + D_n^T P_i = -B_i. \quad (20)$$

Шукана нами величина визначається

$$I_{ij} = Z_n^T(t_0) P_i Z_n(t_0). \quad (21)$$

З результатів дослідження визначено, що в загальному випадку рівняння (20) необхідно вирішувати разів. При цьому на кожному кроці рішення задаються нові значення елементів матриці Z_n .

Інший підхід до рішення даної задачі полягає в наступному. Замість рівняння (20) передбачається вирішувати рівняння

$$\bar{P} D_n^T + D_n \bar{P} = -Z_n(t_0) Z_n^T(t_0). \quad (22)$$

Тоді шукана оцінка визначається

$$I_{ij} = B_i \otimes \bar{P}. \quad (23)$$

або з використанням (20) та (23)

$$I_{ij} = -(P_i D_n + D_n^T P_i) \otimes \bar{P}. \quad (24)$$

Далі остаточно отримуємо наступне рівняння.

$$I_{ij} = -(\bar{P} D_n^T + D_n \bar{P}) \otimes P_i = Z_n(t_0) Z_n^T(t_0). \quad (25)$$

Рівняння (21) і (25) збігаються. Дослідження показують, що в цьому випадку достатньо один раз вирішити рівняння (22) для визначення елементів матриці \bar{P} . В цій матриці діагональні елементи дорівнюють шуканим величинам та вони пропорційні дисперсіям відповідних параметрів.

Висновок

Запропонований підхід дозволяє враховувати в ситуативних системах управління групами безпілотних літаків вплив таких синергетичних аспектів динамічного стану повітряного як турбулентність атмосферних потоків. Це дозволить досягти необхідної функціональної стійкості управління ДПЛА при екологічному моніторингу природного середовища в надзвичайних ситуаціях, при груповому застосуванні дистанційно пілотованих літальних апаратів.

1. *Машков О.А., Чумакевич В.О., Шуренко В.А.* Шляхи створення та дослідження функціонально-стійкої моделі вимірювально-обчислювального комплексу / Збірник наукових праць НАН України, ІПМЕ – „Моделювання та інформаційні технології”, 2003, Вип.. 24, с. 40- 47.
2. *Машков О.А., Барабаш О.В.* Топологічні критерії та показники функціональної стійкості складних ієрархічних систем / Збірник наукових праць НАН України, ІПМЕ – „Моделювання та інформаційні технології”, 2003, Вип.. 25, с. 29-35.
3. *Машков О.А., Кравченко Ю.В., Савченко В.А., Власенко Г.М.* Метод багатокритеріального вибору оптимального варіанта системи радіонавігаційного забезпечення / Збірник наукових праць НАН України, ІПМЕ – „Моделювання та інформаційні технології”, 2003, Вип.. 22, с. 37-41.
4. *Машков О.А., Кононов О.А.* Возможности обеспечения функциональной устойчивости эргатических систем управления в рамках существующего методического аппарата / Зб. наук.пр. / ІПМЕ, Вип. 32, Київ, 2006, с.151-157.
5. *Машков О.А., Дурняк Б.В., Усаченко Л.М., Сабат В.И.* Разработка моделей нештатных ситуаций в автоматизированной системе поддержки принятия решений при управлении подвижным объектом / Моделювання та інформаційні технології / ІПМЕ, НАН України, вип. 48, 2008, с. 3-24.
6. *Машков О.А., Дурняк Б.В., Усаченко Л.М., Сабат В.И.* Методология забезпечення функціональної стійкості ієрархічних організаційних систем управління / Збірник наукових праць: ІПМЕ, НАН України, вип. 48, 2008, с. 3-21.
7. *Машков О.А., Косенко В.Р.* Прийняття управлінських рішень в складних організаційних системах з погляду системного підходу (частина 1) (вступ) / Збірник наукових праць / ІПМЕ НАН України, Вип. 55, 2010.,с. 131-148.
8. *Машков О.А., Косенко В.Р.* Прийняття управлінських рішень в складних організаційних системах з погляду системного підходу (частина 2) (принципи організаційного управління) / Збірник наукових праць / моделювання та інформаційні технології / ІПМЕ НАН України, Вип. 55, 2010.,с. 119-132.
9. *Машков О.А., Косенко В.Р.* Прийняття управлінських рішень в складних організаційних системах з погляду системного підходу (частина3) (системні функції організаційного управління) / Збірник наукових праць / моделювання та інформаційні технології / ІПМЕ НАН України, Вип. 56, 2010.,с. 115-132.
10. *Машков О.А., Косенко В.Р.* Прийняття управлінських рішень в складних організаційних системах з погляду системного підходу (частина 4) (системний підхід в організації управління) / Збірник наукових праць / ІПМЕ НАН України, Вип. 54, 2010.,с. 114-133.

Поступила 25.9.2013р.