

РОЗДІЛ VIII. ТЕХНОЛОГІЇ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 681.5(042.3)

В.В. Семко, канд. техн. наук

Державний університет телекомунікацій, м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ПРИЗЕМНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ

В.В. Семко, канд. техн. наук

Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Viktor Semko, PhD in Technical Sciences

State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine

SIMULATION OF ATMOSPHERIC BOUNDARY TURBULENCE

Наведено результати оброблення даних метеорологічних спостережень та синтезу ідентифікаційної моделі турбулентності приземного шару атмосфери у вигляді тримірного анізотропного поля швидкостей у класі поліномів канонічного вигляду. Згідно з математичною моделлю розроблено імітаційну модель турбулентності приземного шару атмосфери. Проведено аналіз результатів імітаційного моделювання статистичних даних метеорологічних спостережень та турбулентності приземного шару атмосфери. Отримані результати є актуальними під час створення систем управління та тренажерів безпілотних повітряних суден.

Ключові слова: математична модель, імітаційна модель, атмосферна турбулентність, ідентифікація, безпілотне повітряне судно.

Приведены результаты обработки данных метеорологических наблюдений и синтеза идентификационной модели турбулентности приземного слоя атмосферы в виде трехмерного анизотропного поля скоростей в классе полиномов канонического вида. В соответствии с математической моделью разработана имитационная модель турбулентности приземного слоя атмосферы. Проведен анализ результатов имитационного моделирования статистических данных метеорологических наблюдений и турбулентности приземного слоя атмосферы. Полученные результаты являются актуальными при создании систем управления и тренажеров беспилотных воздушных судов.

Ключевые слова: математическая модель, имитационная модель, атмосферная турбулентность, идентификация, беспилотное воздушное судно.

The results of the data of meteorological observations and synthesis of identification turbulence model of the surface layer of the atmosphere in the form of three-dimensional anisotropic velocity field in the class of polynomials in the canonical form are presented. According to the mathematical model developed simulation model of the atmospheric boundary layer turbulence. The results are relevant when creating control systems and pilotless air ship simulators.

Key words: mathematical model, simulation model, atmospheric turbulence, identification, pilotless air ship.

Постановка проблеми. Моделювання турбулентності приземного шару атмосфери у вигляді тримірного анізотропного поля швидкостей є актуальним щодо опрацювання принципів пілотування безпілотних повітряних суден (БПС) у ручному та директорному режимі управління.

Під час оброблення результатів метеорологічних спостережень і моделюванні руху БПС у приземному шарі атмосфери прийнято поділяти швидкість вітру на середній вітер, що має детермінований закон зміни у просторі, та атмосферну турбулентність, яка за сутністю є хаотичними вихровими рухами атмосфери.

Методи, які використовуються для моделювання атмосферної турбулентності, залежать від особливостей застосування результатів. Вони визначаються режимом польоту БПС, його конструкцією і геометричними розмірами. Якщо геометричні розміри літального апарата малі у порівнянні з характерним розміром турбулентних вихорів, то можна вважати, що в усіх точках його поверхні швидкості поривів вітру однакові.

Якщо при цьому траєкторія польоту БПС близька до прямолінійної, задача моделювання атмосферної турбулентності може бути зведена до моделювання одновимірних випадкових процесів, для опису яких використовується їх спектральна щільність.

Якщо геометричні розміри БПС сумірні з масштабом турбулентності і/або траєкторія його польоту істотно відрізняється від прямолінійного польоту, з'являється необ-

хідність моделювання атмосферної турбулентності у вигляді тривимірного випадкового поля. Це дозволяє врахувати додаткові прирости аеродинамічних сил і моментів, що виникають за рахунок нерівномірного розподілу поривів вітру по поверхні БПС.

Зазвичай під час аналізу результатів метеорологічних спостережень використовується земна система координат, яка орієнтована на напрям середнього вітру. Таким чином, вісь спрямована на напрям середнього вітру. Напрямок середнього вітру в нижньому шарі висот вважається незмінним, що характерно для нейтрального стану атмосфери, який трапляється в більшості метеорологічних спостережень.

Аналіз досліджень і публікацій. Турбулентність за функцією щільності розподілу швидкості поривів відрізняється від нормального закону розподілу. В подальшому будемо виходити з припущення про горизонтальну однорідність і стаціонарність поля турбулентності [1]. Такі припущення виправдані для широкого класу завдань. Відомо, що постійна часу зміни статистичних характеристик турбулентності у фіксованій точці простору становить декілька годин. Статистичні характеристики можуть змінюватися в результаті добового ходу температури, проходження атмосферних фронтів і т. ін. Тому для малих інтервалів часу статистичні характеристики атмосферної турбулентності залишаються незмінними [2].

Виділення не вирішених раніше частин глобальної проблеми. Атмосферна турбулентність має вплив на зміну траєкторії просторового руху БПС [3]. З метою дослідження впливу атмосферної турбулентності на просторовий рух БПС створюється імітаційна модель атмосферної турбулентності. У подальшому імітаційна модель може використовуватись як в ергатичній системі управління безпілотного повітряного судна в автоматичному й автоматизованому режимах польоту, так і у тренажерах.

Мета статті. Головною метою роботи є розроблення математичної та імітаційної моделі анізотропного поля швидкостей атмосферної турбулентності як середовища функціонування ергатичної системи управління БПС.

Виклад основного матеріалу. Під час створення моделі атмосферної турбулентності як похідні дані були використані результати метеорологічних спостережень атмосферної турбулентності в районі здійснення польотів БПС.

Після опрацювання даних метеорологічних спостережень була отримана ідентифікаційна модель у класі поліномів шостого ступеня в канонічному вигляді [4] для обчислення значень математичного очікування

$$M(H) = (0,488 + 2,83 \cdot H - 0,8 \cdot H^2 + 0,989 \cdot H^3 + 0,00239 \cdot H^4 - 0,0000596 \cdot H^5 - 0,00000598 \cdot H^6) \cdot 0,00003 + k \quad (1)$$

та дисперсії

$$D(H) = (17,9 + 6,65 \cdot H - 3,06 \cdot H^2 + 0,393 \cdot H^3 + 0,0196 \cdot H^4 - 0,000492 \cdot H^5 - 0,0000243 \cdot H^6) \cdot 0,000025 + m \quad (2)$$

абсолютних значень поривів вітру.

Коефіцієнти k у співвідношенні (1) та m у співвідношенні (2) визначаються за отриманими даними метеорологічних спостережень атмосферної турбулентності в конкретному місці. Для співвідношень (1) та (2) визначені $k=27$, $m=12$.

Слід зазначити, що кількість членів поліномів (1) і (2) визначається вимогами точності до функції найкращого наближення за умовами Лагранжа.

За ідентифікаційними моделями, які наведено у співвідношеннях (1) та (2), розроблено програмні засоби.

Результати імітаційного моделювання математичного очікування (рис. 1) та дисперсії (рис. 2) за співвідношеннями (1) та (2) показали їх відповідність ідентифікаційних моделей похідним даним метеорологічних спостережень.

Під час визначення проекцій зустрічної та бокової складової вектора швидкості вітру V_x були використані припущення про те, що значення математичного очікування зустрічної складової швидкості вітру дорівнює значенню математичного очікування за результатами метеорологічних спостережень, а значення знаходяться у діапазоні

$$\left| \vec{V}_x \right| \in [M(H) - \Delta, M(H) + \Delta]. \quad (3)$$

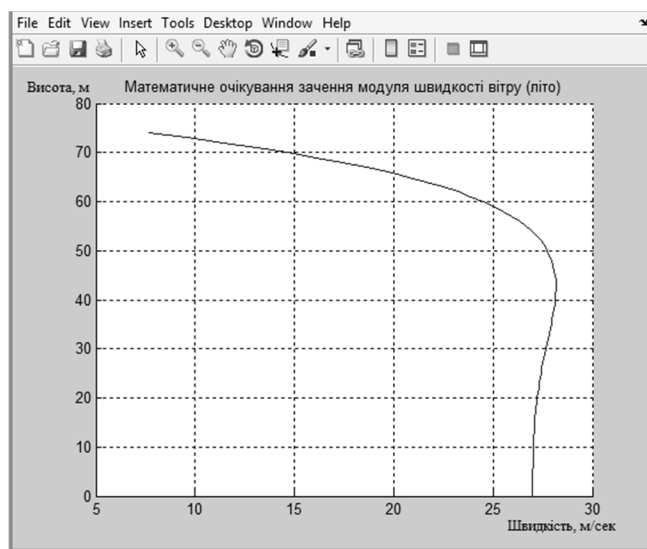


Рис. 1. Результати моделювання математичного спостереження

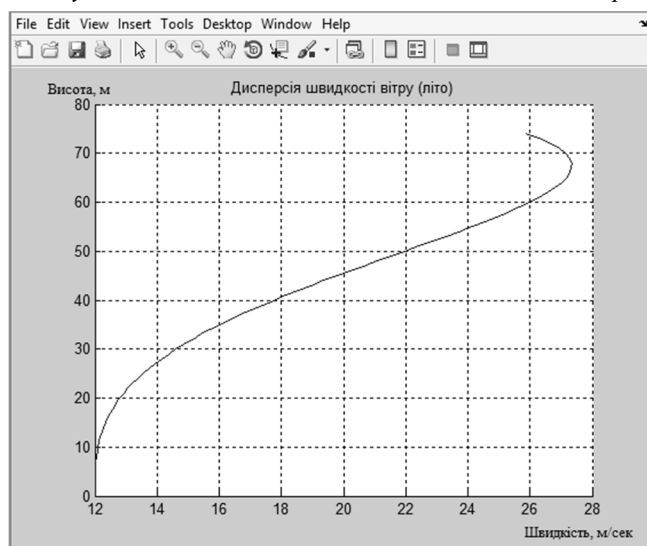


Рис. 2. Результати моделювання дисперсії

Величина Δ у співвідношенні (3) визначається на підставі теореми про те, що відхилення випадкової величини x , яка розподілена за нормальним законом, від математичного очікування $M(x)$ не буде більшим за значенням, ніж модуль величини $\Delta > 0$.

Визначимо функцію для інтегральної формули Муавра-Лапласа

$$\Phi\left(\frac{\Delta}{2}\right) = P(|x - M(x)| \leq \Delta), \quad (4)$$

де $P(x - M(x))$ – значення вірогідності, яке задається; $\Phi\left(\frac{\Delta}{2}\right)$ – функцію для інтегральної формули Муавра-Лапласа.

$$\Phi\left(\frac{\Delta}{2}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (5)$$

Для обчислення значення Δ зі співвідношень (4) та (5) за результатами апроксимації знайдено функцію, яка є оберненою до функції $\Phi\left(\frac{\Delta}{2}\right)$,

$$\Delta = -0,21 + 9,78 \cdot y - 53 \cdot y^2 + 103 \cdot y^3 - 50,1 \cdot y^4 + 1 + 1,75 \cdot y^5 - 68,9 \cdot y^6 + 60,9 \cdot y^7, \quad (6)$$

де y – випадкова величина середнього значення швидкості вітру.

Співвідношення (6) дозволяє обчислити діапазон значень $\left| \vec{V}_x \right|$ та $\left| \vec{V}_z \right|$ згідно зі співвідношенням (3). Слід зазначити, що значення $\left| \vec{V}_x \right|$, яке визначене співвідношенням (3), відповідає рівномірному закону розподілу. Знак проекції $\left| \vec{V}_x \right|$ визначається випадковим чином за рівномірним законом розподілу.

Бокова складова вектора швидкості вітру визначається, як

$$\left| \vec{V}_z \right| = \left| \vec{V}_x \right| \cdot \sin \alpha, \quad (7)$$

де V_z – величина бокової складової швидкості вітру, V_x – величина зустрічної складової швидкості вітру,

$$\alpha = \angle \vec{V} \vec{V}_z. \quad (8)$$

Величина кута $\alpha \in [0, 2\pi)$ і визначається для співвідношення (8) за нормальним законом розподілення.

Значення модуля проекції швидкості вітру V_z обчислюється згідно зі співвідношенням

$$\left| \vec{V}_y \right| = \sqrt{(M(H))^2 - \left(\left| \vec{V}_x \right| \right)^2 - \left(\left| \vec{V}_z \right| \right)^2}, \quad (9)$$

а знак визначається за рівномірним законом розподілу.

Вертикальна проекція вектора швидкості вітру V_y має трапецієвидну форму, для якої визначається крутизна зростання фронту пориву вітру, а знак визначається за рівномірним законом розподілу.

Виходячи зі співвідношень (1)–(9), було розроблено імітаційну модель, результати роботи якої наведено на рис. 3.

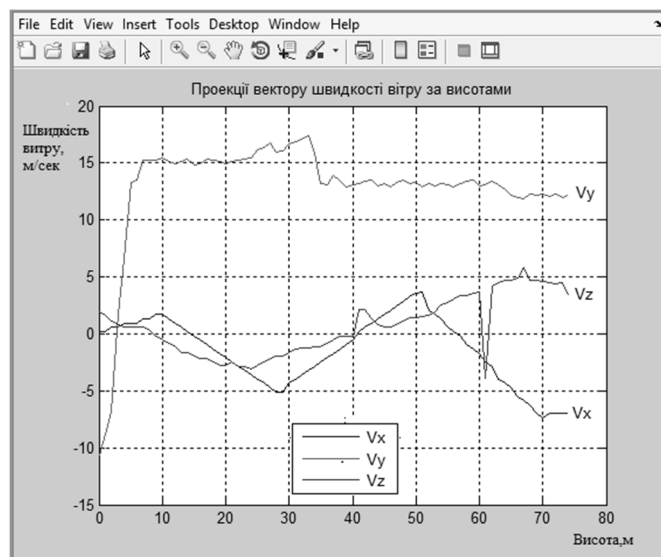


Рис. 3. Результати моделювання атмосферної турбулентності

Порівняння результатів імітаційного моделювання атмосферної турбулентності в діапазоні висот до 75 метрів з експериментальними даними показало відповідність результатів розрахунків даним метеорологічних спостережень.

Імітаційні моделі та програмні засоби можуть бути застосовані у складі ергатичної системи управління БПС під час вирішення задачі конфлікту за умов обмежень та невизначеності, а також у складі тренажерів для пілотів БПС [5].

Висновки і пропозиції. Запропонована модель атмосферної турбулентності може бути використана під час проектування БПС для оцінювання розмірів та конструктивних особливостей, створення ергатичної системи управління, опрацювання моделей використання, створення тренажерів.

Для системи літаководіння імітаційна модель атмосферної турбулентності надає можливість оцінювання навігаційних параметрів польоту БПС (просторового положення та швидкості) у районі польотів.

Список використаних джерел

1. Богаткин О. Г. Основы авиационной метеорологии / О. Г. Богаткин. – СПб. : РГГМУ, 2009. – 338 с.
2. Грязин В. Е. Моделирование пространственного поля скоростей атмосферной турбулентности приземного слоя атмосферы / В. Е. Грязин // Ученые записки ЦАГИ. – 1999. – Вып. № 3-4, т. XXX. – С. 127–138.
3. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В. П. Харченко, В. І. Чепіженко, А. А. Тунік, С. В. Павлова. – К. : Абрис-принт, 2012. – 464 с.
4. Семко В. В. Диалоговая система восстановления многомерных эмпирических зависимостей / В. Н. Голего, В. А. Коротеев, В. В. Семко // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. – Вып. 68. – С. 72–78.
5. Семко В. В. Применение метода интегрального усечения вариантов при синтезе стратегий управления подвижным объектом / В. В. Семко, В. В. Павлов // Кибернетика и вычислительная техника. – 1989. – Вып. 84. – С. 1–6.