

УДК 621.396.67

Ю.О. Гордієнко¹, М.В. Бугайов¹, О.І. Солонець², І.А. Солопій¹¹ Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, Житомир² Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОСОБЛИВОСТІ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В статті проведено аналіз акустичних сигналів малорозмірних безпілотних літальних апаратів. Вказані особливості спектральних оцінок акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів літакового типу з електричними двигунами та двигунами внутрішнього згоряння, а також безпілотних літальних апаратів мультироторного типу. Визначені напрямки реалізації виявлення акустичних сигналів малорозмірних безпілотних літальних апаратів акустичними засобами спостереження.

Ключові слова: акустичний моніторинг, безпілотний літальний апарат, гармоніки акустичного випромінювання, спектральна оцінка, періодограма.

Вступ

Постановка проблеми. Зростання ролі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сучасних збройних конфліктах зумовлює необхідність розвитку підходів щодо боротьби з ними [1-3]. Особливо гостро зазначене питання постало в ході проведення антитерористичної операції на сході України. Одним з основних етапів при вирішенні завдань боротьби з БПЛА противника є виявлення БПЛА у повітряному просторі. Виявлення БПЛА радіолокаційними станціями ускладнено низькою помітністю, особливостями траєкторії польоту (можливість зависання та різкою зміною траєкторії), незначними висотами та швидкостями БПЛА. Візуальне спостереження також не завжди є ефективним, до того ж має низку обмежень фізіологічного характеру спостерігачів. Таким чином пошук нових підходів щодо виявлення літальних апаратів, зокрема БПЛА, з метою подальшої ефективної боротьби з ними, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з напрямків вирішення проблеми виявлення БПЛА є розширення можливостей системи виявлення шляхом доповнення сегментами на інших фізичних принципах. Одним з таких напрямків є акустичні або інфразвукові спостереження. Питанням акустичних спостережень, в тому числі і в інтересах збройної боротьби, приділено значну увагу в роботах [3-9]. Головною перевагою застосування акустичних засобів виявлення літальних апаратів, в тому числі БПЛА, є робота в пасивному режимі, що забезпечує прихованість їх застосування, а тим самим і безпеку обслуговуючого персоналу.

Формулювання мети статті. Метою статті є визначення особливостей акустичних сигналів малорозмірних БПЛА та створення математичних моделей даних сигналів.

Виклад

основного матеріалу дослідження

Шум гвинта літального апарату утворюється, в основному, в результаті силової взаємодії лопатей гвинта з оточуючим середовищем (повітрям) в процесі створення тяги і при витісненні повітря з фіксованого об'єму середовища лопатями. Генерація акустичного випромінювання може також відбуватися і при аеродинамічній взаємодії лопатей з турбулентними утвореннями в набігаючому потоці. У відповідності з цим шум малонавантаженого гвинта поділяють на шум обертання і широкосмуговий шум.

До точки спостереження будуть доходити імпульси, викликані проходженням кожної лопаті, що збурює повітря. Дані збурення відбуваються стільки разів, скільки лопатей має гвинт. Оскільки шум обертання має визначену частоту, то про шум гвинта можна говорити як про звук певного тембру, тобто в ньому будуть існувати гармоніки.

Аналіз повітряного гвинта, що має N лопатей і обертається з кутовою швидкістю Ω , проводять з точки зору періодичних динамічних систем. Для однієї лопаті період складає $T = 2\pi/\Omega$. В безрозмірному часі, що вимірюється величиною азимуту ε , період дорівнює 2π . Для гвинта період складатиме $T = 2\pi/N\Omega$ [10].

Акустичний сигнал БПЛА представляє собою суму гармонік з частотами, кратними частоті обертання ротора або колінвала двигуна F . Амплітуди гармонік зменшуються зі збільшенням частоти. Причому в режимі стаціонарного польоту (рівномірний прямолінійний рух, двигун працює в одному режимі) амплітуда кожної наступної гармоніки при збільшенні її частоти менша за амплітуду попередньої гармоніки. Під час зміни режиму роботи двигуна або під час виконання маневру відбувається зміна

частоти акустичного випромінювання. В останньому випадку вона зумовлена ефектом Доплера. Також при виконанні маневру змінюється орієнтація БПЛА відносно точки спостереження і через спрямованість акустичного випромінювання змінюється інтенсивність акустичного поля в точці прийому. При вищевказаних умовах амплітуди деяких вищих гармонік можуть перевищувати амплітуди низькочастотних гармонік (в переважній же більшості випадків перша гармоніка має найбільшу амплітуду). Тому в загальному випадку амплітуди гармонік представляють собою випадкові величини. Фази гармонік також є випадковими величинами, розподіленими за рівномірним законом. Оскільки основним джерелом акустичного шуму БПЛА з електричним двигуном (ЕД) є шум гвинта, то математична модель акустичного випромінювання БПЛА за відсутності шумів може бути представлена у наступному вигляді:

$$x_{\text{ЕД}}(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi N F_m t + \varphi_m), \quad (1)$$

де M – кількість гармонік акустичного випромінювання; A_m – амплітуда m -тої гармоніки; N – кількість лопатей гвинта; φ_m – фаза m -тої гармоніки.

Дана модель була створена на основі проведених вимірювань та аналізу акустичних сигналів БПЛА і подальшої статистичної обробки отриманих результатів. Спектральний аналіз прийнятих реалізацій сигналів проводився за допомогою періодограм. На рис. 1 представлено періодограму акустичного сигналу БПЛА з ЕД і повітряним гвинтом з трьома лопатями. Частота дискретизації сигналу $f_s = 8$ кГц, довжина швидкого перетворення Фур'є складає $N = 512$.

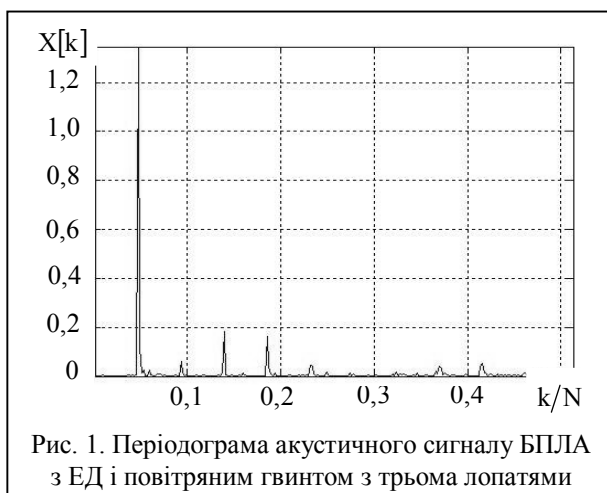


Рис. 1. Періодограма акустичного сигналу БПЛА з ЕД і повітряним гвинтом з трьома лопатями

Основним джерелом шуму БПЛА з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) є сам двигун. Другорядним джерелом шуму виступає повітряний гвинт. Модель його акустичного сигналу можна записати у вигляді:

$$x_{\text{ДВЗ}}(t) = x_{\text{ДВ}}(t) + x_{\text{ГВ}}(t), \quad (2)$$

де

$$x_{\text{ДВ}}(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cos(2\pi F_k t + \varphi_k); \quad (3)$$

$$x_{\text{ГВ}}(t) = x_{\text{ЕД}}(t);$$

A_k – амплітуда k -ої гармоніки; K – кількість гармонік акустичного випромінювання ДВЗ; φ_k – фаза k -ої гармоніки.

Для БПЛА, що має двотактний ДВЗ, гвинт з двома лопатями, гармоніки акустичного випромінювання, номери яких кратні двом (парні), матимуть амплітуду більшу, ніж сусідні гармоніки (непарні). Якщо ж БПЛА має чотиритактний ДВЗ, то гармоніки, номери яких кратні чотирьом, матимуть амплітуду, більшу за амплітуди сусідніх гармонік. Це пояснюється додаванням потужностей гармонік акустичного випромінювання двигуна та повітряного гвинта.

Виняток з даного правила становить перша гармоніка, яка зазвичай має найбільшу амплітуду. Періодограма акустичного сигналу малорозмірного БПЛА з ДВЗ зображена на рис. 2.

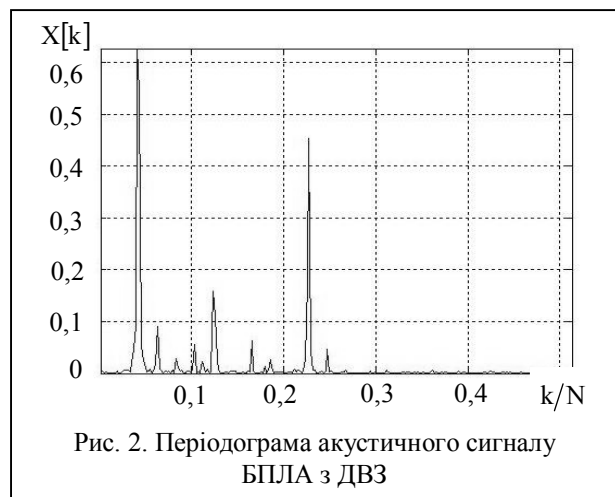


Рис. 2. Періодограма акустичного сигналу БПЛА з ДВЗ

З підвищенням частоти гармоніки відбувається розширення спектральних ліній акустичного випромінювання двигунів обох типів, оскільки починають проявлятися шуми випадкового походження

Акустичне випромінювання БПЛА мультироторного типу від одного гвинта описується аналогічно БПЛА з ЕД (ДВЗ на БПЛА такого типу як правило не використовуються). Зазвичай частоти кожного з двигунів не співпадають, а відрізняються на деяку незначну величину, що залежить від динаміки руху БПЛА. Тоді математичну модель акустичного випромінювання такого БПЛА можна записати у вигляді:

$$x_{\text{МР}}(t) = \sum_{p=1}^P x_p(t), \quad (4)$$

де $x_p(t) = x_{ED}(t);$ (5)

P – кількість гвинтів.

Через різницю частот обертання гвинтів спектральні лінії акустичного випромінювання будуть розширеними в порівнянні зі спектральними лініями акустичного випромінювання БПЛА літакового типу (з одним гвинтом). На рис. 3 наведена періодограма акустичного випромінювання БПЛА мультироторного типу з чотирма гвинтами.

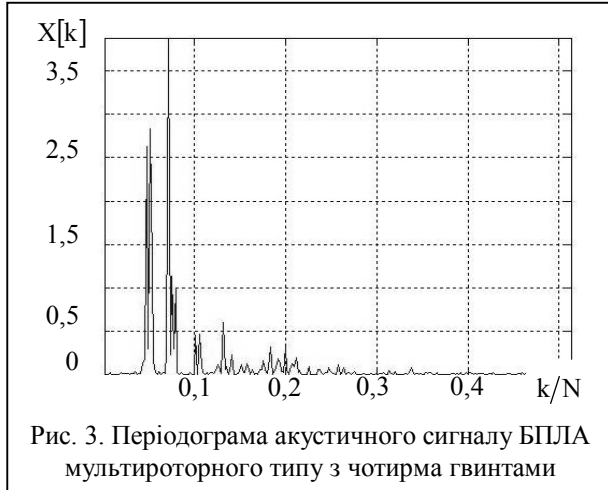


Рис. 3. Періодограма акустичного сигналу БПЛА мультироторного типу з чотирма гвинтами

Оскільки управління БПЛА мультироторного типу здійснюється саме за рахунок несучих повітряних гвинтів (зміни частоти їх обертання), то саме цим і пояснюється розширення спектральних ліній в порівнянні з БПЛА літакового типу (з одним гвинтом).

Зі збільшенням кількості повітряних гвинтів спектр акустичного сигналу такого БПЛА стає ще більше насиченим спектральними лініями (рис. 4). З отриманої спектральної оцінки дуже важко зробити висновок, що в зоні огляду акустичного пристрою спостереження знаходиться БПЛА. Для цього необхідно проводити подальшу обробку отриманої періодограми для виявлення кратних гармонічних складових.

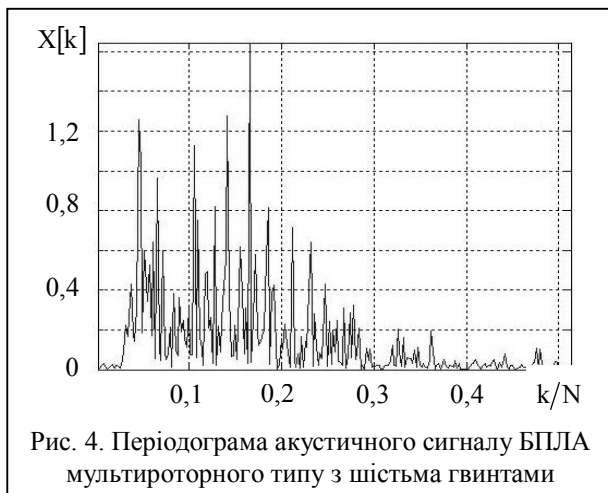


Рис. 4. Періодограма акустичного сигналу БПЛА мультироторного типу з шістьма гвинтами

В загальному ж випадку сигнали акустичного випромінювання БПЛА є частотно-модульованими і їх моделі для ДВЗ та повітряного гвинта БПЛА літакового типу можна записати у наступному вигляді (без урахування випадкових фазових зсувів гармонік):

$$S_{ДВ}(t) = \sum_{i=1}^{MK} A_i \sin \left\{ 2\pi \left[F + A_{m_i} \sin(2\pi F_m t) \right] it \right\};$$

$$S_{ГВ}(t) = \sum_{i=1}^K A_i \sin \left\{ 2\pi M \left[F + A_{m_i} \sin(2\pi F_m t) \right] it \right\},$$

де A_{m_i} – індекс частотної модуляції акустичного сигналу, що виникає внаслідок зміни режиму роботи двигуна або виконання маневру; F_m – частота модуляції, викликана зазначеними ефектами.

Як було зазначено вище, частотний склад акустичного випромінювання БПЛА безпосередньо пов'язаний з параметрами двигуна або повітряного гвинта (їх частотою обертання). Це також стосується і інших літальних апаратів.

На рис. 5 та 6 зображені спектральні оцінки типових акустичних сигналів вертольота та гвинтомоторного літака відповідно. В них також можна простежити гармонічні складові, що пов'язані з частотами обертання їх повітряних гвинтів.

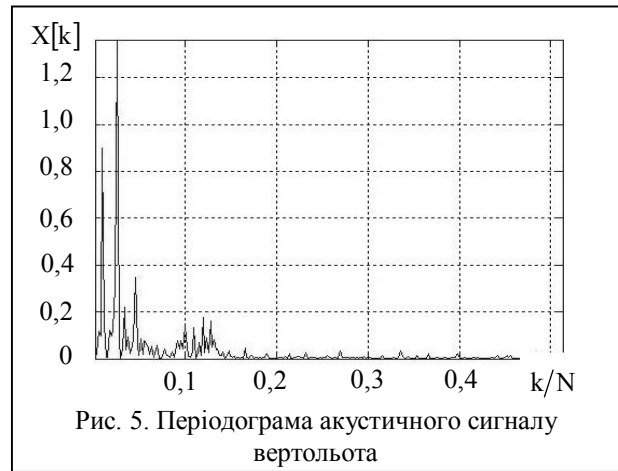


Рис. 5. Періодограма акустичного сигналу вертольота

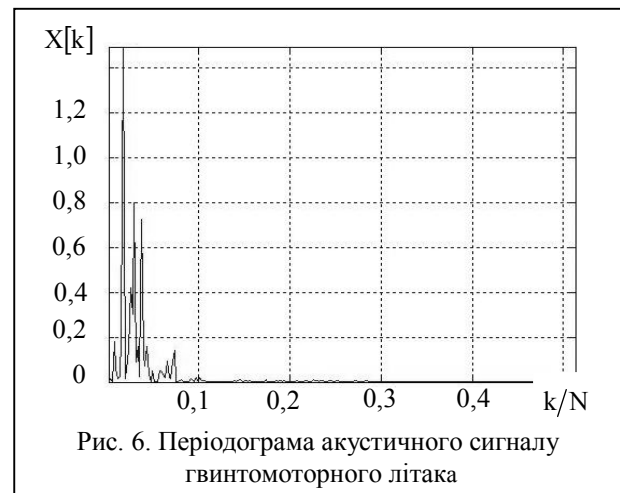


Рис. 6. Періодограма акустичного сигналу гвинтомоторного літака

Проте основна частина енергії цих сигналів зосереджена в області низьких частот (400-500 Гц). Це в свою чергу дає потенційну змогу виділяти акустичні сигнали безпілотного літального апарату на фоні сигналів інших літальних апаратів шляхом застосування низькочастотної фільтрації.

Висновки

Аналіз акустичних сигналів БПЛА літакового та мультироторного типу показали, що їх спектри мають гармонічну структуру з частотами, кратними частоті обертання ротора або колінвала двигуна. Більш чітко гармонічні складові спектру простежуються для БПЛА літакового типу.

Для мультироторного ж типу спектральні лінії є більш широкими через неоднаковість частот обертання гвинтів.

В подальшому доцільно провести порівняння даних, отриманих експериментальним шляхом та модельних залежностей, та визначити акустичні портрети конкретних безпілотних літальних апаратів з метою їх виявлення.

Список літератури

1. Соколовський В.В. Проблемні питання та перспективні напрямки боротьби з малорозмірними надлегкими БЛА у внутрішньому збройному конфлікті / В.В. Соколовський, Ю.В. Самсонов // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 32-35.
2. Даник Ю.Г. Проблеми застосування угруповань малих безпілотних літальних апаратів мультикоптерного типу для вирішення військових завдань / Ю.Г. Даник, І.В. Пулеко, П.П. Топольницький, С.В. Чуб // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ НАУ, 2013. – Вип. 8. – С. 98-105.

3. Даник Ю.Г. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів / Ю.Г. Даник, І.В. Пулеко, М.В. Бугайов // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2014. – № 71(4). – С. 71-80.

4. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // Georgia Inst. of Technology / GTRI / ATAS, Atlanta. 16th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. – P. 1-16.

5. Самохин В.Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым двигателем в толкающей компоновке / В.Ф. Самохин, С.П. Остроухов, П.А. Мошков // Электрон. журнал "Труды МАИ". – Вып. № 70. – С. 1-24.

6. Гордиенко Ю.А. Возможности инфразвукового мониторинга для использования в интересах Вооруженных Сил / Ю.А. Гордиенко, А.И. Ляцук, А.И. Солонец // Системи обробки інформації : зб. наук. пр. – X.: XV ПС, 2006. – Вип. 4 (53). – С. 207-210.

7. Sadasivan S. Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation / S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, S. Ravi Sekar // Eronautical DEF SCI J. – 2001. – Vol. 51, № 3. – P. 279-283.

8. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / L. Marino // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University "La Sapienza", Rome, Italy. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. – P. 1-14.

9. Соловйов О.В. Експериментальні дослідження рівня шуму БПЛА "Стрепет-М" / О.В. Соловйов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил : зб. наук. пр. – X.: ХУПС, 2010. – Вип. 2 (24). – С. 36-39.

10. Александров В.Л. Воздушные винты / В.Л. Александров. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1951. – С. 376-377.

Надійшла до редколегії 16.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ю.А. Гордиенко, Н.В. Бугаёв, А.И. Солонец, И.А. Солопий

В статье проведен анализ акустических сигналов малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Указаны особенности спектральных оценок акустического излучения беспилотных летательных аппаратов самолетного типа с электрическими двигателями и двигателями внутреннего сгорания, а также беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа. Определены направления реализации выявления акустических сигналов малоразмерных беспилотных летательных аппаратов акустическими средствами наблюдения.

Ключевые слова: акустический мониторинг, беспилотный летательный аппарат, гармоники акустического излучения, спектральная оценка, периодограмма.

PARTICULAR QUALITIES OF UNMANNED AERIAL VEHICLE 'S ACOUSTIC SIGNALS

Y.A. Gordienko, N.V. Bougaiov, A.I. Solonets, I.A. Solopij

In the article analysis of small UAV's acoustic signals is done. Peculiarities of spectral estimates of UAV's acoustic emission with electric engine and gasoline engine are shown. Periodograms of multi-propeller UAV's are also presented. Approaches for such signals detection with acoustic means are proposed.

Keywords: acoustic monitoring, unmanned aerial vehicle, harmonics of acoustic emission, spectral estimate, periodogram.