УДК 629.7.014,534.2

DOI:https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334109

О. В. Душеба[1], *PhD студент* **П. В. Лук'янов**[2], *к.ф.-м.н., с.н.с.*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЧИСЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ШУМУ ПРОПЕЛЕРА

Ua У даній роботі виконано експериментальний та розрахунковий аналіз шуму пропелера *P*17×5.8 для 2500 об/хв і 7000 об/хв. Експеримент показав, що при 7000 об/хв максимальний рівень шуму становив 79,2 *dB* під пропелером і згасав до 75,3 *dB* на відстані чотирьох діаметрів пропелера. У спектрі гармонік переважають низькочастотні тональні компоненти на частоті проходження лопатей та її гармоніках. Чисельне моделювання в *ANSYS* підтвердило подібний розподіл у частотному спектрі, але показало дещо вищі рівні шуму, що пояснюється відмінностями у геометрії та ідеалізованими розрахунковими моделями. Отримані результати збігаються з експериментальними та числовими даними інших досліджень, що підтверджує ефективність запропонованої експериментальної установки, яку у подальшому планується використати для вивчення шуму оптимальної за формою лопаті.

En In this paper, the experimental and computational analysis of the noise of the P17×5.8 propeller for 2500 rpm and 7000 rpm was carried out. The experiments showed that at 7000 rpm, the maximum noise level was 79.2 dB under the propeller and decreased to 75.3 dB at a distance of four propeller diameters. The harmonic spectrum is dominated by low-frequency tonal components at the blade frequency and its harmonics. Numerical modelling in ANSYS confirmed a similar distribution in the frequency spectrum, but showed higher noise levels, which is explained by differences in geometry and idealised design models. The obtained results coincide with the experimental and numerical data of other studies, which confirms the effectiveness of the proposed experimental setup, which is planned to be used in the future to study the noise of the optimal blade shape.

Вступ

Шум, який створюють безпілотні літальні апарати (БПЛА), є серйозною проблемою як для довкілля, так і для практичного використання цих апаратів. У містах він заважає людям, викликає скарги, що обмежує використання дронів. У військових або спостережних місіях гучний апарат легше виявити.

Шум пропелера складається з кількох основних типів: тонального шуму (пов'язаного із частотою обертання), широкосмугового шуму, імпульсного високочастотного шуму, а також шуму взаємодії вихорів із лопа-

[1] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*

тями (*Blade Vortex Interaction, BVI*). У цьому дослідженні основну увагу приділено тональному шуму.

Шум пропелера досліджується експериментально та чисельно. Експерименти дають змогу отримати дані у реальних або наближених до них умовах, однак не дозволяють точно локалізувати джерело шуму. Чисельне моделювання дозволяє проаналізувати потік навколо лопатей і визначити, що саме є джерелом шуму. Наведемо аналіз наявних результатів подібних досліджень за останні роки.

У роботі [1] представлено експериментальне дослідження шуму дво-, три- та чотирилопатевих пропелерів у безлунній камері. Показано, що збільшення кількості лопатей не гарантує зниження рівню шуму, натомість виявлено залежить рівня шуму від геометрії лопатей і числа обертів пропелера. Авторами [2] розглянуто інстальований пропелер, який працює у турбулентному граничному шарі. Встановлено збільшення рівня як тонального, так і широкосмугового шуму залежно не тільки від конкретного пропелера, а й від компоновки його по відношенню до інших деталей апарату. Також вимірювання шуму в різних режимах проведено у [3]. Найвищий рівень шуму спостерігається за низької ефективності пропелера. Роботи [4, 5] порівнюють вимірювання в безлунній камері та на відкритому просторі. Показано, що в замкнутому об’ємі спостерігається зміна спектру шуму завдяки рециркуляції повітря. Це підтверджує доцільність проведення вимірювань у відкритому тихому середовищі, що враховано у наведеному у даній роботі дослідженні. Шум ефективно моделюється за допомогою *CFD*-розрахунків і методу Ффоукса-Вільямса–Хокінгса (*FWH*) у разі низьких числах Рейнольдса [6]. Встановлено, що основним інтенсивним джерелом шуму є прикінцева частина лопатей, де формуються вихори, що зриваються із лопатей. Експериментально даний процес дослідити важко, тому використовують чисельний аналіз.

Також суттєвим є вплив ефекту землі [7]. Виявлено додаткові піки шуму внаслідок відбиття акустичних хвиль, а також можливе зниження шуму залежно від висоти. Показано, що зменшення обертів пропелера із одночасним збільшенням діаметра дає значне зниження шуму (до 15 dB) без втрати тяги [8]. Авторами [9] проаналізовано два профілі лопатей із однаковими геометричними розмірами. Встановлено, що тонший профіль із більшою хордою створює більш широку частотну смугу. У роботі [10] узагальнено методи зниження шуму пропелерів. Ключовим фактором залишається форма лопатей.

Більш глибоке вивчення генерації шуму пропелера можливе завдяки докладному порівнянню експериментальних даних із числовими розрахунками на ЕОМ, що й пропонується авторами даної роботи.

Постановка задачі

Метою даної роботи є розробка експериментальної установки, експериментальне та чисельне дослідження рівня шуму у спектрі пропелера *P*17×5.8 на різних частотних режимах обертання пропелера, порівняння отриманих експериментальних даних результатів із результатами чисельного моделювання у *ANSYS Fluent*. Здійснити порівняльний аналіз існуючих даними подібних досліджень задля уточнення основних джерел шуму пропелера, а також із майбутнім подальшим вдосконалення експериментальної установки за для вивчення шуму лопаті оптимальної форми.

Чисельний розрахунок аеродинамічного шуму

У даній роботі проведено наскрізне чисельне моделювання аеродинамічного шуму (звуку) за допомогою програмного забезпечення *ANSYS Fluent*. Характеристики поля течії розраховано із використанням моделі *SST* k-ω [11], [12]:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_k\frac{\partial}{\partial x_j}k\right]+G_k-Y_k+S_k;\\ &\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j\omega)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_\omega\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega. \end{aligned} \tag{1}$$

А безпосередній розрахунок шуму виконано на основі рівняння *Ffowcs Williams–Hawkings*:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2}-c_0^2\nabla^2 p'=\frac{\partial}{\partial t}Q(x,y)+\nabla\cdot F(x,y)+T_{ij}(x,y), \tag{2}$$

яке дозволяє обчислювати звук, що утворився внаслідок цього. У рівнянні (2): p' – акустичний тиск, c_0 – швидкість звуку в нерухомому середовищі, $Q(x,t)$– джерело маси (об'ємне джерело), $F(x,t)$– джерело імпульсу (поверхневе джерело), $T_{ij}(x,t)$– тензор в'язких напружень Лайтхілла.

В інтегральному вигляді рівняння (2) для тиску у звуковому дальньому полі набуде вигляду:

$$\begin{aligned} p'(x,t)=&\frac{1}{4\pi}\int_S\left[\frac{\rho_0\dot{v}_n}{r(1-M_r)^2}\right]_{ret}dS+\frac{1}{4\pi}\int_S\left[\frac{p'n_i}{r(1-M_r)^2}\right]_{ret}dS+\\ &+\frac{1}{4\pi}\int_S\left[\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}\frac{1}{r}\right]_{ret}dV. \end{aligned} \tag{3}$$

Позначення '*ret*' означає, що значення розраховуються в момент запізнення. Проте результати моделювання залежать від обраних математич-

них моделей і низки параметрів, які містять обмеження на реальну течію. Отже, для перевірки чисельних розрахунків необхідне порівняння розрахункових даних із фізичним експериментом.

Експериментальне дослідження шуму пропелера

Була розроблена експериментальна установка, яка дозволяє вимірювати рівні шуму на відкритій місцевості, віддаленій від джерел шуму, з урахуванням впливу навколишнього середовища, вітру, землі та розташування мікрофона. Вимірювання проводилися на режимах роботи двигуна 2500 об/хв та 7000 об/хв.

Для експерименту використовувалися: пропелер *P*17×5.8, двигун *MN*505-*S IP*45, *ESC FLAME* 100*A*, серво-тестер для регулювання обертів, акумулятор, стенд для вимірювання тяги, лазерний тахометр, мікрофон *Behringer ECM*8000 із вітрозахистом, аудіо-інтерфейс *Alctron XU*-2*MKII*, а також смартфон для запису звуку. Установка наведена на рис. 1.

Мікрофон фіксувався в дев'яти точках (рис. 2), що відповідали визначеним відстаням та кутам від пропелера. Вимірювання обертів здійснювались за допомогою лазерного тахометра.

Рис. 1. Експериментальна установка

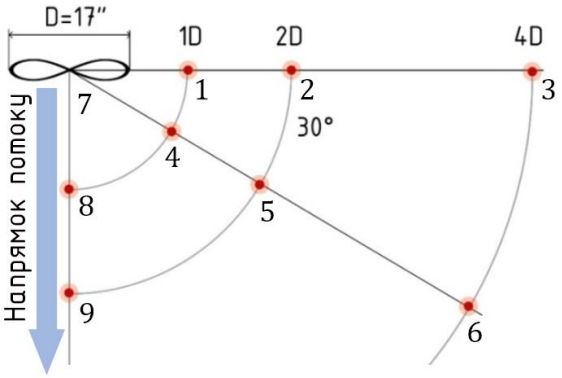

Рис. 2. Схема розташування точок вимірювання шуму

Спектральний аналіз шуму під час різних режимів обертання

На рис. 3 і рис. 4 наведено спектри серії вимірів збоку (справа) від площини пропелера. А саме у точках 1 і 3 на частоті обертання (*RPM*) 7000 обертів за хвилину. Тяга 3,125 кг відповідно.

Обидва спектри мають яскраво виражений основний тон біля 200 Гц, а також гармоніки на вищих частотах 400 Гц, 800 Гц тощо. Це відповідає 7000 об/хв. У першому випадку середньоквадратичне значення рівня шуму (*RMS*) склало 73,8 *dB*. У другому випадку *RMS* = 68,2 *dB*. Це узгоджується із квадратичною залежністю інтенсивності шуму від відстані від джерела.

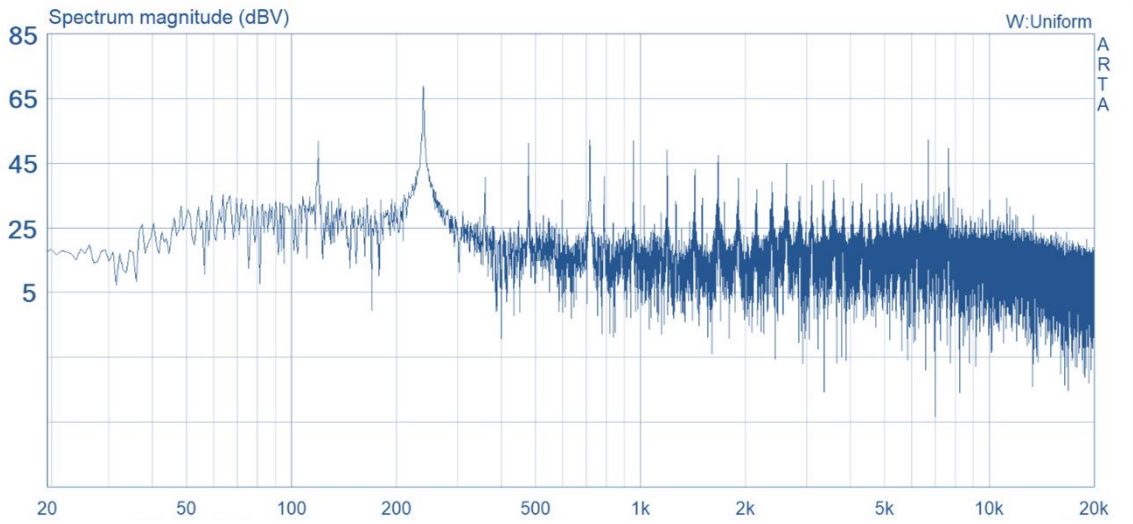

Рис. 3. Відстань – 1 діаметр; точка 1

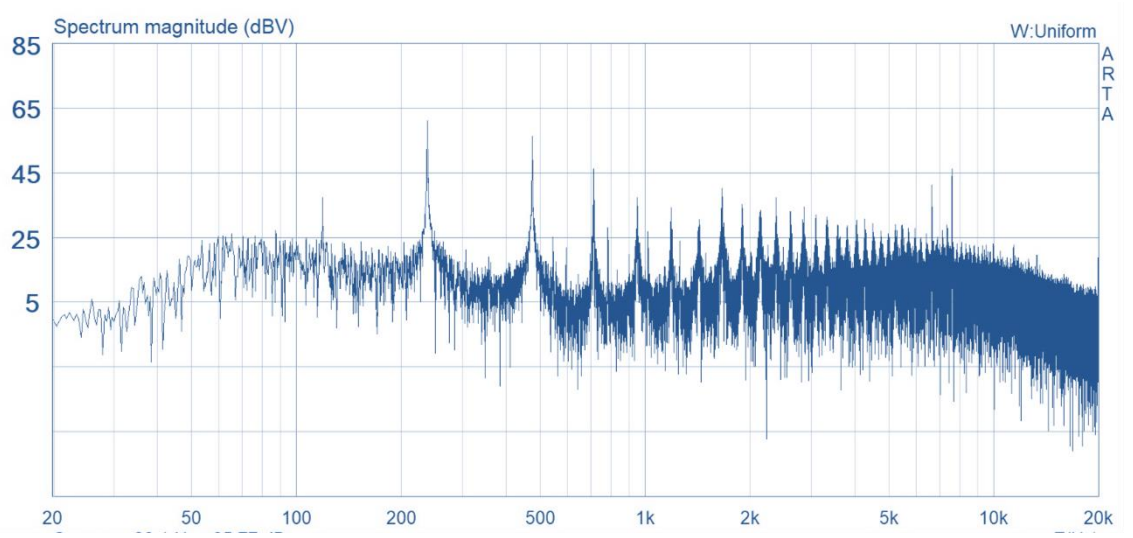

Рис. 4. Відстань – 4 діаметри; точка 3

Вимірювання шуму двигуна без пропелера показали нижчі рівні *RMS*: 62,4 *dB* (на відстані 1 діаметр) за 7000 об/хв, що свідчить про те, що саме аеродинамічний шум є домінуючим у загальному рівні шуму експериментальної системи. Отже, основним джерелом шуму високого рівня є саме пропелер, а не двигун. А тому потрібно шукати шляхи його зменшення.

Серії вимірів під кутом 30° від площини пропелера. А саме в точках 4, 5 і 6 на частоті обертання (*RPM*) 7000 об/хв., показали, що на відстані одного діаметру, у точці 4, *RMS* = 75,1 *dB*. На відстані двох діаметрів, у точці 5, *RMS* = 73 *dB*. На відстані чотирьох діаметрів у точці 6, *RMS* = 70,7 *dB*.

На рис. 5 і рис. 6 наведено спектри серії вимірів вниз по потоку пропелера. А саме у точках 7 і 8 відповідно. Частота обертання (*RPM*) складає 7000 об/хв. Тяга склала 3,125 кг.

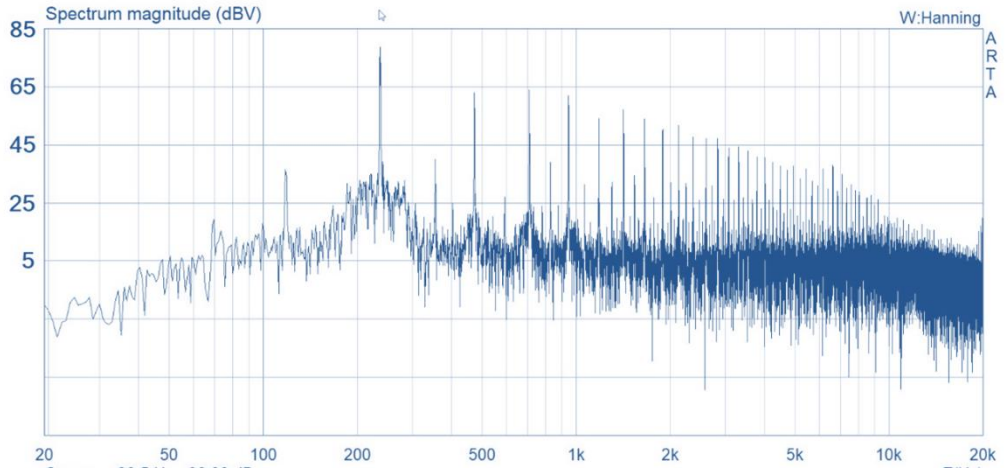

Рис. 5. Відстань – 0 діаметр. Точка 7. *RMS* = 79,2 *dB*

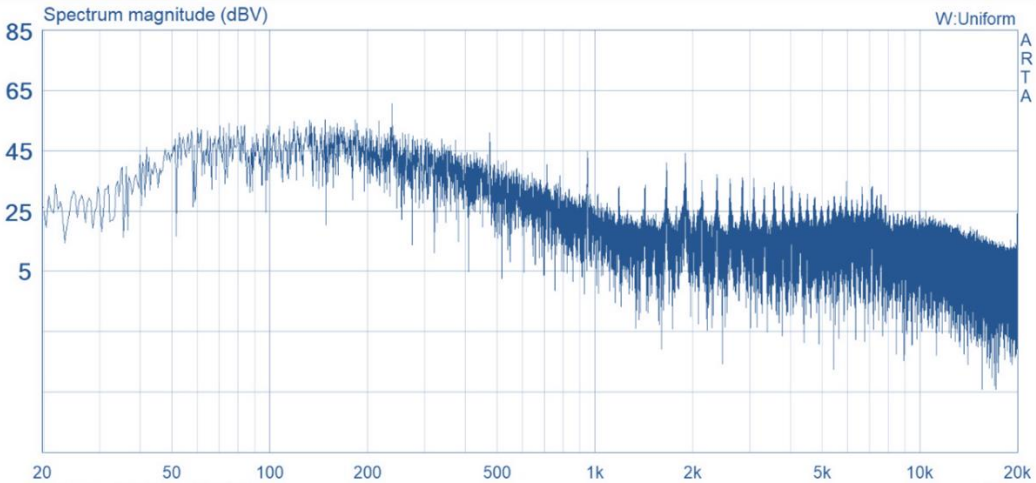

Рис. 6. Відстань – 1 діаметр. Точка 8. *RMS* = 76,7 *dB*

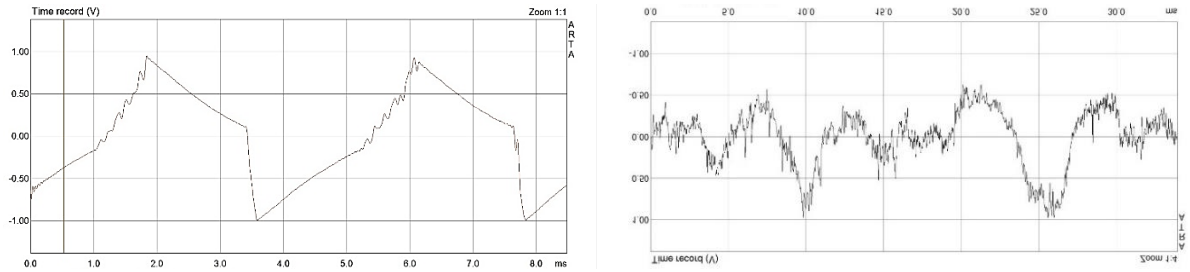

Рис. 7. Форма хвилі у точках 7 і 8 відповідно

На відстані двох діаметрів (точка 9), *RMS* = 76,9 *dB*.

На рис. 7 видно, що ближче до пропелера хвиля набуває більш чітку форму, з виділеним домінування тональних компонентів на частоті проходження лопатей (*BPF*) та її гармоніках, які мають періодичну структуру. На цій відстані турбулентність ще не встигає заподіяти розсіяння звукові хвилі, що забезпечує чітку гармонійну форму сигналу із вираженими піками і спадами. На більш віддаленій від пропелера відстані турбулентність розсіюється, стає більш хаотичною. При цьому відбувається розсіювання

звукової хвилі на турбулентності, що призводить до перерозподілу енергії звукової хвилі у більшу кількість гармонік, ніж у тональному шумі, а шум при цьому перетворюється на широко-смужний.

У точках 8 і 9 на частоті обертання (*RPM*) 2500 об/хв. Тяга склала 0,165 кг. На відстані одного діаметра (точка 8). *RMS* = 66,4 *dB*. На відстані двох діаметрів (точка 9), *RMS* = 69 *dB*. Така різниця у рівнях шуму може бути пояснена впливом аеродинамічних збурень повітря, які виникають під час руху повітряного потоку біля капсули мікрофона. Мікрофон вловлює ці збурення як низькочастотний шум, що сильно спотворює результати, особливо під час вимірювання акустичних характеристик, як-от рівень звукового тиску пропелера. Отже, потрібен більш надійний вітрозахист, що розсіює турбулентність до її потрапляння у звукову мембрану, знижуючи спотворення на частотах нижче 500 Гц, незначно впливаючи на корисний сигнал.

На відстані одного діаметру мікрофон знаходиться ближче до пропелера, де повітряний потік має вищу швидкість та більшу турбулентність. Це призводить до додаткових аеродинамічних шумів навколо мікрофона, що можуть маскувати тональні компоненти та знижувати значення *RMS* шуму.

На відстані двох діаметрів потік повітря від пропелера стає більш розсіяним та менш турбулентним, що знижує вплив аеродинамічного шуму на мікрофон. У результаті, тональні компоненти від проходження лопатей стають більш виразними, що призводить до зростання *RMS* до 69 *dB*. Це узгоджується із фізичними законами аеродинаміки, за якими турбулентність зменшується з віддаленням від джерела збурення.

Таким чином, можна припустити, що збільшення *RMS* у разі віддалення до двох діаметрів пов'язане із меншим впливом турбулентного повітряного потоку та кращою передачею звукових хвиль до мікрофона.

Аналіз спектрів показав, що зростання частоти обертання призводить до збільшення інтенсивності гармонік на основній частоті обертання (*BPF*) та кратних їй частотам. У частотному діапазоні від 0,1*kHz* до 3*kHz* чітко виділені низькочастотні гармоніки шуму гвинта. Але починаючи із частоти 3 - 4 *kHz*, практично у всіх випадках (рис. 3) у частотному спектрі помічено "білий шум".

Експериментальні дані показали, що на частоті обертання 2500 об/хв середній рівень шуму коливається від 65,7 *dB* (у разі вимірювання збоку на відстані одного діаметру) до 69 *dB* (під пропелером на відстані двох діаметрів). Під час збільшення частоти обертання до 7000 об/хв рівень шуму значно підвищується і досяг 79,2 *dB* контрольної точки вимірюванні під пропелером на відстані 0 діаметрів. Результати вимірювань демонструють наступну закономірність: відбувається зниження рівня шуму із віддаленням від пропелера у залежності, що обернено пропорційна відстані 1/*r* при обертах 7000 об/хв. Зниження *RMS* (*Root Mean Square* – середнє квадрати-

чне значення звукової потужності) склало із 79,2 *dB* (на відстані 0 діаметрів) до 75,3 *dB* (на відстані чотирьох діаметрів). Крім того, найбільший рівень шуму фіксувався під пропелером, що обумовлено переважною напрямленістю звукових хвиль у цьому секторі.

Порівняння отриманих даних з результатами інших досліджень

У цьому дослідженні для пропелера *P*17×5,8 зафіксовано максимальний рівень шуму 79,2 *dB* при 7000 об/хв безпосередньо під пропелером. Як і у роботах [1, 3, 4], основний шум утворювався на частоті проходження лопатей та її гармоніках, що підтверджує загальну закономірність домінування низькочастотних тональних компонентів у спектрі. У [1] на Ø15 см, 6000 об/хв, ~53 *dB*, у [2] Ø24 см, 5200 об/хв, ~63 *dB*, а також у [3] Ø33 см, 6000 об/хв, до 91 *dB*. Усі ці дані, як і наші дані, демонструють експоненційну залежність *SPL* від добутку діаметра та частоти обертання.

Низькочастотний характер шуму також було виявлено в експериментальних дослідженнях [14], [15], які порівнювались із розрахунками на основі спрощеної моделі [16]. Однак, найближчий збіг за частотним наповненням та рівнем гармонік у спектрі, наведеному на рис. 3, спостерігається у роботі [17]. Таке співпадіння експериментальних даних пояснюється тим, що у роботі [17] також дослідження виконувались для одиночного пропеллера у шумоізольованих умовах. Диаграма напрямленості, наведена у [17], також підтверджує факт максимального значення рівня шуму на вісі пропелера, тобто на відстані 0 від пропеллера.

На відстані чотирьох діаметрів шум знижувався до 75,3 *dB*, що відповідає закону зменшення рівня звуку за залежністю 1/*r* і збігається із даними [2]. Це вказує на узгодження теоретичних моделей шуму пропелера із експериментом у дальньому звуковому полі. Крім цього, максимальна напрямленість випромінювання шуму спостерігається переважно внизу, під пропелером. Вимірювання під різними кутами показали, що найгучніше – саме під пропелером. Це підтверджують співпадає з результатами досліджень [3] та [8], де також зафіксовано напрямлене випромінювання шуму вниз, що пов'язано з вихорами, які утворюються на кінчиках лопатей. Відмінності у рівнях шуму у разі різного положення мікрофона також узгоджуються з даними роботи [2], де показано, що спектр змінюється залежно від кута вимірювання.

Різниця даних у порівнянні з іншими дослідженнями пояснюється кількома причинами. По-перше, різницею у конструкції пропелера, яка впливає на спектр шуму, а саме, кількістю лопатей. У нашому випадку дволопатевий *P*17×5.8. Менша кількість лопатей дає менше тональних компонентів і, відповідно, нижчий рівень шуму. У роботі [4] чотирилопатеві пропелери показали вищі значення рівню шума. По-друге, частота обертання є важливою характеристикою шумоутворення. У роботі [3] для

частот, подібних частотам даного експерименту, спостерігався пік шуму на основній частоті обертання, що збігається із результатами досліджень даної роботи. Це підтверджує перевагу шуму обертання як тонального низькочастотного шуму, оскільки максимум у спектрі випромінювання спостерігається саме на перших гармоніках.

Значний вплив має й розташування експерименту. Ми проводили вимірювання близько до землі. У [2] та [7] показано, що близькість до поверхні може спричиняти додаткові піки через відбиття звуку. Це особливо помітно на низьких частотах.

Ще один важливий фактор це те, що число Рейнольдса у нашому експерименті становить приблизно $1{,}6 \cdot 10^5$, що удвічі більше, ніж у [6], де $Re = 8 \cdot 10^4$. Через це у виникали високочастотні піки через мікровихори, які відриваються від лопаті. У нашому випадку число Рейнольдса було вищим, тому потік був стійкіший, а високочастотні компоненти слабші.

Таким чином, результати проведених експериментальних досліджень підтверджують основні закономірності, отримані іншими авторами: рівень шуму зростає із частотою обертання, у спектрі переважають *BPF*-гармоніки, а різні положення мікрофона вказують на певну напрямленість шуму, що генерується. Відмінності в абсолютних значеннях пояснюються відмінностями в конструкції пропелера, режимах обертання, числі Рейнольдса та умовах проведення експерименту. Експериментальна установка, розроблена автором роботи, буде використана у подальших дослідженнях аналізу шуму лопатей пропелера оптимальної форми.

Порівняння результатів моделювання у *ANSYS* із даними експерименту

Під час чисельного моделювання у *ANSYS* для розрахунку обтікання пропелера використовувалась модель турбулентної течії *SST* k-ω. Для розрахунку акустичного тиску застосовано рівняння *Ffowcs Williams–Hawkings* (*FW-H*).

Порівняння числових розрахунків у *ANSYS* із даними експерименту виявило як подібності, так деякі відмінності. За даними чисельного моделювання максимальний рівень шуму біля кінчика лопаті сягав 120 *dB*, у той час як в експерименті – 79,2 *dB* під пропелером. Це пояснюється тим, що шум досить швидко загасає у разі віддалення від джерела шуму. Під час моделювання у 3*D* рівень шуму знижувався до 80 *dB* у близькій точці та до 60 *dB* на відстані 5-6 довжин лопаті. В обох випадках у спектрі домінували тональні компоненти на кратних *BPF* частотах – 233,3 *Hz*, 466,6 *Hz*, 700 *Hz*, 933,3 *Hz*.

Результати експерименту підтвердили максимуму випромінювання на тих саміх частотах, що і дав чисельний розрахунок. Найбільший шум — під пропелером на нульовій відстані. На відстані чотирьох діаметрів рівень

шуму знизився до 75,3 *dB*, що узгоджується із законом 1/*r*. Як експеримент, так і чисельний розрахунок показали перевагу низьких частот у спектрі дальнього поля. Основні відмінності між числовими розрахунками та експериментом пов'язані з різною геометрію.

Пропелер *P*17×5.8 має діаметр 43,2 см, крок 14,7 см. На відміну від цього, лопать із параболічним профілем і меншою круткою (−2°), меншою хордою (2,25 см), за таких самих обертах демонструє більш рівномірне поле тиску та зниження інтенсивності шуму у всіх напрямках, із загальним рівнем у ближньому полі 95–108 *dB*, що зменшується до 78–82 *dB* на відстані 1,5–2 м. Це підтверджує, що геометрія з меншою хордою та контрольованою круткою значно знижує спрямованість і рівень аеродинамічного шуму, особливо у ближньому полі. Крім того чисельна модель у *ANSYS* не враховує хоча й невеликий, але присутній, вітер та відбиття від землі. Також впливає тип потоку, у чисельному розрахунку він потенційний із зональною нестійкістю, що може завищувати шум. В експерименті навпаки, турбулентність може знижувати рівень тональних піків.

Незважаючи на це, обидва методи показали однакові спектральні закономірності, зокрема домінування *BPF* та гармонік. Це підтверджує правильність як вимірювань, так і загальної моделі. Проте для точнішого прогнозу рівнів шуму потрібне більш досконалі моделі турбулентності та врахування реальних умов середовища.

Висновки

Рівень шуму та спектральне наповнення для пропелера *P*17×5.8 узгоджуються із результатами інших досліджень. Шум зростав із підвищенням обертів, а в спектрі домінували тональні компоненти на частоті проходження лопатей біля мікрофону та її гармоніках. Максимальний шум становив 79,2 *dB* за 7000 об/хв під пропелером і знижувався до 75,3 *dB* на відстані чотирьох діаметрів, що відповідає закону 1/*r*.

Чисельне моделювання у *ANSYS* показало співпадіння домінуючих частот, але рівень шуму вищий – до 120 *dB*. Це пояснюється перш за все певною різницею у геометрії лопатей, ідеалізацією розрахункової моделі (не врахування вітру, впливу землі). Це вплинуло на різницю амплітуд у виміряних та розрахованих даних, але фізичні закономірності збереглися: зростанням рівня шуму з одночасним збільшенням обертів пропелера, напрямленим випромінюванням під пропелером.

Методика проведення експерименту на запропонованій експериментальній установці показала свою ефективність. Моделювання у *ANSYS* дозволяє проводити порівняльний аналіз розрахункових даних із експериментом, що надалі буде використано під час порівняння експериментальних даних оптимальної малошумної лопаті з відповідними числовими. Резуль-

тати досліджень можуть бути корисні для проєктування мультикоптерного аеротаксі зі зниженим рівнем шуму.

Список використаної літератури

1. Duseja M. Aeroacoustic measurements of different types of propellers / Duseja M., Thiagarajan K. B. // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2311, No. 030026. – https://doi.org/10.1063/5.0034715.
2. Falsi M. A multivariate statistical analysis of the noise emitted by an installed propeller / Falsi M., Zaman I., Meloni S., Camussi R., Zang B., Azarpeyvand M. // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2590, No. 012009. – https://doi.org/10.1088/1742-6596/2590/1/012009.
3. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / Marino L. // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2010. – https://doi.org/10.2514/6.2010-3854.
4. Whelchel J. Propeller Noise in Confined Anechoic and Open Environments / Whelchel J., Alexander W. N., Intaratep N. // AIAA SciTech Forum. – 2020. – https://doi.org/10.2514/6.2020-1252.
5. Smagorinsky J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations / Smagorinsky J. // Monthly Weather Review. – 1963. – Vol. 91, No. 3. – P. 99–164. – https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1963MWRv...91...99S/doi:10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2.
6. Grande E. Aeroacoustic Investigation of a Propeller Operating at Low Reynolds Numbers / Grande E., Romani G., Ragni D., Avallone F., Casalino D. // AIAA Journal. – 2022. – Vol. 60, No. 2. – P. 860–871. – https://doi.org/10.2514/1.J060611.
7. Hanson L. Experimental investigation of propeller noise in ground effect / Hanson L., Jawahar H. K., Vemuri S. S. // Journal of Sound and Vibration. – 2023. – Vol. 559, No. 117751. – https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117751.
8. Brungart T. A. The reduction of quadcopter propeller noise / Brungart T. A., Olson S. T., Kline B. L., Yoasd Z. W. // Noise Control Engineering Journal. – 2019. – Vol. 67, No. 4. – P. 252–269. – https://doi.org/10.3397/1/376723.
9. Zhang Y. Aeroacoustics Analysis of Propeller Blades / Zhang Y., Zhao L., Zhao T., Liu L., Xu L. // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2569, No. 012026. – https://doi.org/10.1088/1742-6596/2569/1/012026.

10. Miljković D. Methods for Attenuation of Unmanned Aerial Vehicle Noise / Miljković D. // Proceedings of MIPRO. – 2018. – https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400169.
11. Menter F. R. Improved Two-equation k- Turbulence Models for Aerodynamic Flows / Menter F. R. // NASA Technical Memorandum 103975. – 1992. – P. 38. – https://ntrs.nasa.gov/citations/19930013620.
12. ANSYS Inc. ANSYS Fluent 6.3 User's Guide, Chapter 6: "Reynolds Number and Flow Regime" – Accessed: Apr. 30, 2025. – https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm.
13. Ffowcs Willams J. E. Sound Generated by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion / Ffowcs Willams J. E., Hawkings D. L. // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 1969. – Vol. 264, Iss. 1151. – P. 321–342. – http://dx.doi.org/10.1098/rsta.1969.0031.
14. Михальов Д. В. Результати експериментальних даних щодо вимірювань рівнів шумів в акустичному полі квадрокоптера / Михальов Д. В., Сокол Г. І. // Вісник ДНУ, серія "Ракетно-космічна техніка". – 2024. – №33(4). – С. 177–185. – https://doi.org/10.15421/452441.
15. Roger M. Tonal-noise assessment of quadrotor-type UAV using source-mode expansions / Roger M., Moreau S. // Acoustics. – 2020. – Vol. 2, Iss. 3. – P. 674–690. – https://doi.org/10.3390/acoustics2030036.
16. Gutin L. On the Sound Field of a Rotating Propeller / Gutin L. // NACA Technical Memorandum No. 1195. – Washington: 1948. – 22 p. – https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030068996/downloads/20030068996.pdf.
17. Schmal J. Acoustic Characterization of a Quadcopter Using a Test Stand / Schmal J., Herrin D. W., Fernández Comesaña D. // QuietDrones 2024, 8th–11th September, Manchester. – P. 1–13. – https://salford.figshare.com/articles/conference_contribution/Acoustic_Characteriza-tion_of_a_Quadcopter_Using_a_Test_Stand/27697371/1/files/50438655.pdf